



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica

2014

**Rúben António
Tomé Jardim**

**Caracterização do comportamento mecânico em
regime estático e dinâmico de aglomerados de
cortiça**



**Rúben António
Tomé Jardim**

**Caracterização do comportamento mecânico em
regime estático e dinâmico de aglomerados de
cortiça**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa, e do Professor Doutor António Manuel de Bastos Pereira, Professores Auxiliares do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Dedico este trabalho a todos que acreditaram em mim.

o júri

Presidente

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo

Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Doutor José Luís Soares Esteves

Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade do Porto

Orientador

Prof. Doutor Ricardo José Alves de Sousa

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Concluída mais uma etapa deixo algumas palavras de agradecimento a todos que me apoiaram ao longo desta jornada.

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, o Prof. Ricardo Sousa por toda a dedicação, paciência e persistência, assim como os conhecimentos e a amizade que me ofereceu.

Agradeço ao Prof. António Bastos, que tive a oportunidade de ter como co-orientador, pela paciência e disponibilidade.

Agradeço também à Petibol, à CorksRibas, à Sofalca e em especial à NAU Helmets e o Dr. Nuno pela disponibilidade

Ao Fábio Fernandes e ao Sá Farias pela ajuda na parte prática e boa disposição.

Aos meus colegas que me acompanharam nestes últimos 5 anos por todo o apoio, boa disposição, compreensão e paciência.

Aos meus amigos gafanhões pelos momentos únicos e inesquecíveis, pela honestidade e amizade.

Finalmente agradeço os meus pais e irmãos, por me conduzirem neste caminho, por todo o apoio incondicional, força, motivação e amor.

palavras-chave

Cortiça, aglomerados de cortiça, aglomerados de cortiça expandida, ensaios estáticos, ensaios dinâmicos, duplo impacto, absorção de energia, materiais sustentáveis.

resumo

A cortiça é um material natural capaz de absorver uma grande quantidade de energia quando deformada e apresenta um retorno viscoelástico que a permite retomar a sua forma original quando retiradas as solicitações. Esta característica é particularmente interessante para um material que se pretende que tenha capacidade de suportar múltiplos impactos. Neste estudo, diferentes tipos de aglomerados de cortiça e aglomerados de cortiça expandida foram submetidos a ensaios mecânicos e comparados entre si e com materiais celulares sintéticos vulgarmente utilizados para a absorção de impactos. Foram realizados ensaios de duplo impacto com recurso a um impactor hemisférico e os valores de pico de aceleração foram comparados entre si. Os ensaios estáticos permitiram obter um conhecimento mais aprofundado dos aglomerados. Com curvas de tensão-deformação e variação do coeficiente de Poisson com a deformação. Os resultados demonstram uma clara influência do tipo de processo de fabrico, tamanho de grão e densidade. É evidenciado neste trabalho o enorme potencial dos aglomerados de cortiça como material de valor para aplicações de absorção de impacto e a possibilidade de futuros estudos de produção de aglomerados com fins específicos.

Keywords

Cork, agglomerated cork, expanded cork, static tests, dynamic loading, multiple impact, energy absorption, sustainable materials.

Abstract

Cork is a natural sustainable material with the ability to absorb a large amount of energy when deformed. It also exhibits a viscoelastic behavior that allows to recover its original shape. This feature is an interesting asset to applications where multiple impact may occur. In this work, different types of agglomerated cork were studied and compared among them and against common synthetic cellular materials used for energy absorption. Double impact tests were carried with a hemispheric impactor and the peak acceleration value were compared among them. A more profound knowledge of the agglomerated cork was achieved with static tests through stress-strain curves and variation of the Poisson coefficient. The results manifest a clear influence depending on the granulometry, type of binder, manufacturing process and density. It is demonstrated with this work the tremendous potential of agglomerated cork as excellent material for impact absorption application and its production focusing specific applications.

Índice

1. Fundamentos teóricos	3
1.1 Guia de leitura.....	3
1.2 Materiais celulares	4
1.3 A cortiça: material celular	8
1.4 A cortiça: extração e produção	11
1.5 Aplicações dos materiais celulares.....	15
1.6 Motivação e objetivos	19
 2. Procedimentos experimentais	23
2.1 Amostras	23
2.2 Ensaio estático.....	26
2.3 Ensaio dinâmico.....	36
2.4 Discussão de resultados.....	44
 3. Conclusões	51
3.1 Conclusões	51
3.2 Trabalhos futuros	52
 Referências bibliográficas	55

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura Sandwich: núcleo de aglomerado de cortiça e peles de alumínio [Alcântara 2013].	4
Figura 2 - Curva tensão-deformação típica de um material celular elástico à compressão [Gibson 1997].	6
Figura 3 - Comportamento à compressão dos materiais celulares, [Gibson 1997].	8
Figura 4 - Principais direções e orientações da cortiça em relação ao tronco do sobreiro [Fortes 2004].	10
Figura 5 - Célula de cortiça e as suas dimensões [Gibson 1997].	10
Figura 6 - Secção tangencial de cortiça amadia: (a) imagem obtida por microscopia eletrónica de varrimento, (b) esquema com indicação do número de lados de cada célula [Fortes 2004].	11
Figura 7 - Sobreiro [Belchior 2008]	12
Figura 8 – Desbóia [Fortes 2004]	12
Figura 9 - Cortiça virgem (a) e amadia (b), [Pereira 2007].	14
Figura 10 - Aglomerado de cortiça expandida	15
Figura 11 - Microestrutura de materiais celulares: (a) poliuretano de célula aberta, (b) polietileno de célula fechada, (c) espuma de níquel, (d) espuma de cobre, (e) espuma de zircónia, (f) espuma de mulite, (g) espuma de vidro, (h) poliéster de célula aberta e fechada, (i) espuma de EVA, (j) cortiça. a,b,c,d,e,h,i [Gibson1997]; i [Verdejo 2004]; j [Fortes 2004].	17
Figura 12 - Placas de aglomerado de cortiça	24
Figura 13 - Imagens ampliadas dos aglomerados. (a) AC216; (b) AC157; (c) AC178; (d) AC199; (e) EC159.	25
Figura 14 - Amostra de EPP90 (a) e EPS90 (b).	26
Figura 15 - Videoextensómetro.	27
Figura 16 - Shimadzu AG50KN.	28
Figura 17 - Ensaio de compressão uniaxial.	29
Figura 18 - Gráfico deslocamento-carga da máquina de ensaios	30
Figura 19 - Curva tensão-deformação dos aglomerados de cortiça.	32
Figura 20 - Curva tensão deformação espumas sintéticas e aglomerados de cortiça.	33

Lista de Figuras

Figura 21 – Valores médios e intervalos de dispersão do módulo de Young dos aglomerados de cortiça.....	34
Figura 22 – Valores médios e intervalos de dispersão do módulo de Young das espumas sintéticas vs. aglomerado de cortiça.	35
Figura 23 - Coeficiente de Poisson.	36
Figura 24 - Pormenor da torre de queda.	37
Figura 25 - Curvas de aceleração para o impactor de 10 kg.	39
Figura 26 - valor de aceleração médio do pico para o impactor de 10 kg.	41
Figura 27 - Curvas de aceleração para o impactor de 5 kg.	42
Figura 28 - valor de aceleração médio do pico para o impactor de 5 kg.	43
Figura 29 - Valor de deformação e tensão correspondentes para absorver 250, 500 e 750 kJ/m ³	45
Figura 30 - Quantidade de energia absorvida até uma tensão de 6,5 MPa vs. densidade..	46

Lista de Tabelas

Tabela 1- Descrição dos aglomerados; PU - Poliuretano; SA - Sem Aglomerante	24
Tabela 2 - Aumento percentual dos valores médios do pico de aceleração para o impactor de 10 kg.....	41
Tabela 3 - Aumento percentual dos valores médios do pico de aceleração para o impactor de 5 kg.....	44

Capítulo 1

Fundamentos teóricos

1. Fundamentos teóricos

Neste capítulo é feita uma descrição sobre materiais celulares assim como a cortiça e seus derivados. Também é abordada a teoria dos materiais celulares e é descrito o processo de extração de cortiça e produção dos aglomerados de cortiça.

1.1 Guia de leitura

Capítulo 1: Neste capítulo é feita uma descrição sobre materiais celulares assim como a cortiça e seus derivados. Também é abordada a teoria dos materiais celulares e é descrito o processo de extração de cortiça e produção dos aglomerados de cortiça.

Capítulo 2: Neste capítulo são apresentados os procedimentos usados na realização dos ensaios estáticos e dinâmicos. Também se apresentam os resultados obtidos seguidos de uma breve discussão.

Capítulo 3: Neste capítulo realiza-se as conclusões finais. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

1.2 Materiais celulares

Os materiais celulares têm encontrado um crescente interesse como solução para diversas aplicações de engenharia. Estes têm um potencial imenso que ainda não é completamente explorado. Apesar do crescente uso de espumas com origens recentes como as espumas metálicas e poliméricas, estes materiais já são utilizados pelo ser humano há milhares de anos como a madeira para a criação de estruturas e a cortiça para isolamento térmico e osso para o fabrico de ferramentas. Estes apresentam uma combinação de propriedades singulares como bom isolamento térmico e acústico e uma elevada rigidez, grande capacidade de absorção de energia e elevada tensão de cedência em relação à sua massa.

Os materiais celulares têm diversas aplicações como almofadas, revestimento de embalagens e isoladores. Caso sejam combinados com peles rígidas exteriores formam painéis sandwich (Figura 1) que combinam uma elevada rigidez específica e leveza.

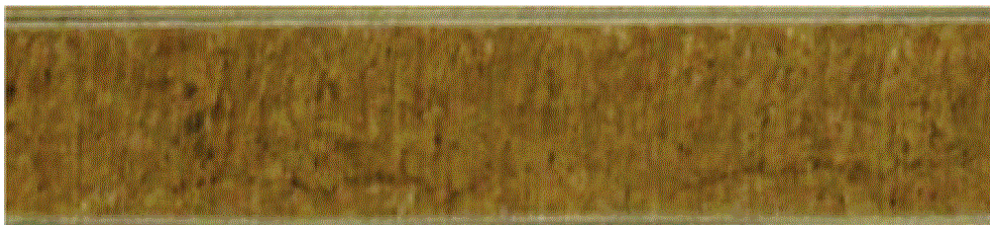


Figura 1 - Estrutura Sandwich: núcleo de aglomerado de cortiça e peles de alumínio [Alcântara 2013].

Quase todos os materiais podem ser utilizados para formar estruturas celulares. A maioria dos polímeros consegue formar facilmente um material celular através da injeção de gás pressurizado no polímero na fase líquida. Um processo alternativo é misturar químicos que libertam dióxido de carbono com os grânulos de polímero antes do ciclo de aquecimento, que posteriormente ficam retidos na forma de bolhas no interior do polímero [Gibson 1997].

As propriedades dos materiais celulares são influenciadas pela geometria das suas células, pelas propriedades do material constituinte das paredes celulares e pela sua densidade relativa. Este último parâmetro é talvez o mais influente na propriedade mecânica do material. A densidade relativa é definida por ρ/ρ_s , em que ρ é a densidade do material celular e ρ_s é a densidade do material constituinte da parede celular. Um material para ser considerado celular tem de possuir uma densidade relativa inferior a 0,5 [Gibson 1997].

As células nos materiais celulares apresentam uma estrutura poliédrica aberta, no caso de esponjas, ou fechada, por exemplo na cortiça [Gibson 1997].

Propriedades mecânicas dos materiais celulares

Quando um material celular é comprimido, a sua curva tensão deformação apresenta 3 zonas distintas (Figura 2). Para pequenas deformações o material deforma-se de forma linear elástica. Depois segue-se uma zona de grande deformação com tensão quase constante (*plateau*). Finalmente atinge-se a zona de densificação em que as paredes das células são esmagadas umas contra as outras e observa-se um crescimento acentuado da tensão para pequenas deformações.

Na zona linear elástica, as paredes das células comportam-se como vigas solicitadas à flexão. O valor aproximado do módulo de Young pode ser obtido com recurso à equação:

$$\frac{E}{E_s} \approx \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 \quad (1.1)$$

Em que E_s corresponde ao valor do módulo de Young do material sólido constituinte das paredes do material celular. Tendo em conta que a densidade relativa pode variar entre 0.5 e 0.005, o que corresponde a uma variação na ordem de 10^2 , isto permite obter módulos elásticos que apresentam uma variação na ordem de 10^4 . Desta forma, os materiais celulares podem-se fabricar de forma a se adaptarem a uma grande variedade de aplicações. O módulo linear elástico

encontra-se restrito para deformações inferiores a 5%. Acima deste valor de deformação, alguns materiais celulares continuam a permitir uma recuperação elástica, denominado de viscoelástico, mas a sua resposta não é linear.

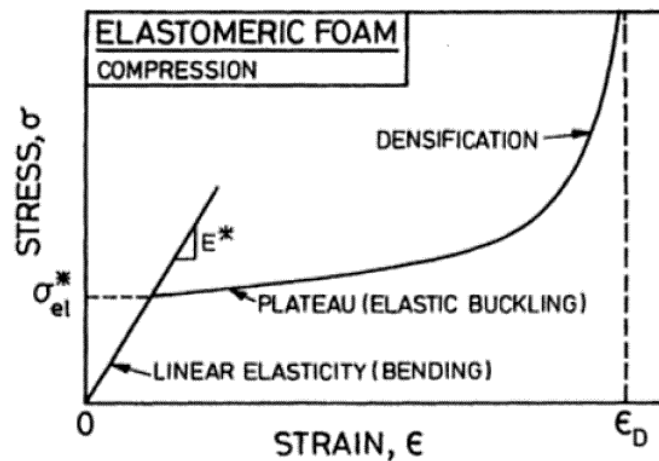


Figura 2 - Curva tensão-deformação típica de um material celular elástico à compressão [Gibson 1997].

Para deformações superiores ao do limite linear elástico até se atingir a densificação, os materiais celulares apresentam um patamar (*plateau*). Este é causado pela encurvadura das paredes celulares. Através da equação 1.2, é possível determinar a tensão de colapso para materiais celulares. Como se pode verificar, a tensão de cedência é função mais uma vez da densidade relativa, mas agora elevada ao quadrado, assim como o módulo de Young do material constituinte das paredes celulares. Através de alterações controladas nestes dois parâmetros, pode-se produzir um material com as propriedades ótimas para uma dada aplicação de engenharia, como por exemplo a produção de um acondicionamento para ferramentas sensíveis que não possam ultrapassar certos valores de tensão em impactos. Também aumentando o rácio de densidades ou o valor do módulo de Young pode-se obter materiais mais adequados para o acondicionamento de ferramentas mais robustas.

$$\frac{\sigma_{el}^*}{E_s} = 0,05 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (1.2)$$

Caso o material constituinte das paredes celulares tenha o seu limite plástico imediatamente a seguir ao regime linear elástico, este atinge o seu ponto de rotura e o *plateau* continua a existir, mas ao contrário do que acontecia anteriormente, neste caso, é provocado pela rotura gradual das paredes celulares. Um exemplo são as espumas cerâmicas, que por apresentarem fratura frágil são incapazes de retomar à sua posição inicial após a deformação.

Finalmente, para grandes deformações atinge-se a densificação. Esta fase é caracterizada por um aumento acentuado da tensão para pequenos aumentos da deformação. Apesar de, para valores de deformação próximos da densificação ainda haver potencial para absorção de energia, é de evitar utilizar, uma vez que os valores de tensão alcançados rapidamente ultrapassam aos previstos por projeto. Isso implica, no caso de um impacto, valores de aceleração muito superiores aos obtidos na zona de patamar. Também nesta zona, o valor de tensão aumenta de forma bastante abrupta.

Como já foi referido e evidenciado pelas fórmulas anteriores, a densidade relativa é o factor de maior influencia nas propriedades mecânicas dos materiais celulares. A Figura 3 ilustra esquematicamente como varia a curva tensão-deformação de um material celular à compressão. Como se pode verificar no regime linear elástico, o módulo de Young aumenta com o aumento da densidade relativa. Também a tensão média do patamar aumenta com o aumento da densidade relativa. Já a densificação ocorre para deformações menores com o aumento da densidade relativa. Também se pode concluir pela Figura 3 que na realização de trabalho de compressão, W , existe para um dado material celular, uma densidade relativa ótima para absorver essa energia. Se a densidade relativa for demasiado elevada, a tensão do patamar (*plateau*) será demasiado alta. Se por outro lado a densidade relativa for demasiado baixa, alcança-se a densificação antes de absorver toda a energia e consequentemente tensões superiores à ótima. Esta análise é

particularmente útil no projeto de equipamentos com a finalidade de absorver impactos [Gibson 1997].

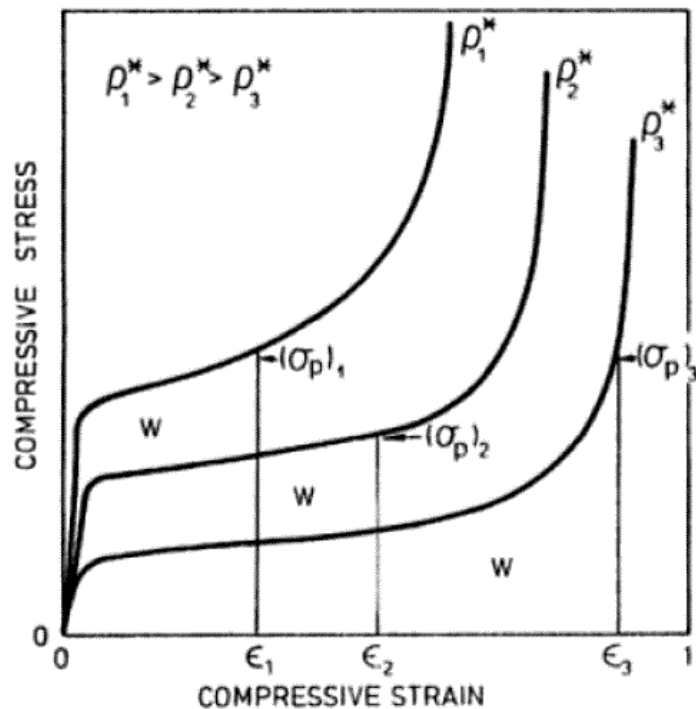


Figura 3 - Comportamento à compressão dos materiais celulares, [Gibson 1997].

1.3 A cortiça: material celular

Dada a estrutura celular da cortiça, podem-se definir três direções principais designadas de acordo com a orientação em relação ao tronco da árvore. Onde a direção alinhada com o raio designa-se de radial e a direção segundo o eixo da árvore denomina-se por axial. Finalmente a direção tangente à superfície da árvore designa-se por tangencial. Na Figura 4 pode-se observar de forma esquemática o que anteriormente foi descrito.

As células da cortiça apresentam em média a estrutura de um prisma hexagonal, embora o polígono possa ter entre 4 a 9 lados mas preferencialmente apresenta entre 5 a 7 (Figura 6). As células encontram-se empilhadas em colunas, cujo eixo

tem a direção radial. Estas possuem em média 14 células adjacentes. Também as suas bases não são planares e são em geral ligeiramente inclinadas em relação ao plano tangencial. Uma outra característica da estrutura da cortiça reside na irregularidade das paredes segundo a direção axial, que geralmente apresentam entre 2 a 3 ondulações completas, apresentando assim uma forma semelhante a uma concertina (Figura 5). As dimensões das células da cortiça variam bastante, quer de cortiça para cortiça, quer numa mesma prancha de cortiça. Em média as paredes celulares têm uma altura de 40 μm , um lado de base hexagonal de 20 μm , uma espessura de parede celular de 1 μm , uma distância entre picos de ondulação da parede celular de 15 μm e uma amplitude de ondulação de 5 μm . Para se ter uma melhor noção da ordem de grandeza das células da cortiça, dentro de 1 mm^3 existe aproximadamente 20 000 células [Gibson 1997].

As propriedades específicas da cortiça, assim como nos materiais celulares em geral, dependem fortemente da sua densidade relativa. A fracção volúmica da fase sólida da cortiça constitui entre 10 % a 15% do volume total do material, sendo as células da cortiça fechadas e o restante volume preenchido por gás. A densidade do material que compõe as paredes celulares é aproximadamente 1150 kg/m^3 . O composto da parede celular é um compósito que inclui lenhina, celulose e a suberina, um biopolímero de carácter lipídico responsável pela muito baixa permeabilidade da cortiça ao ar e água, assim como a sua resistência a muitos ácidos, a sua baixa condutividade térmica e acústica e elevada capacidade de dissipação de vibrações. Também a presença de células abertas na superfície de cortiça explica o elevado coeficiente de atrito.

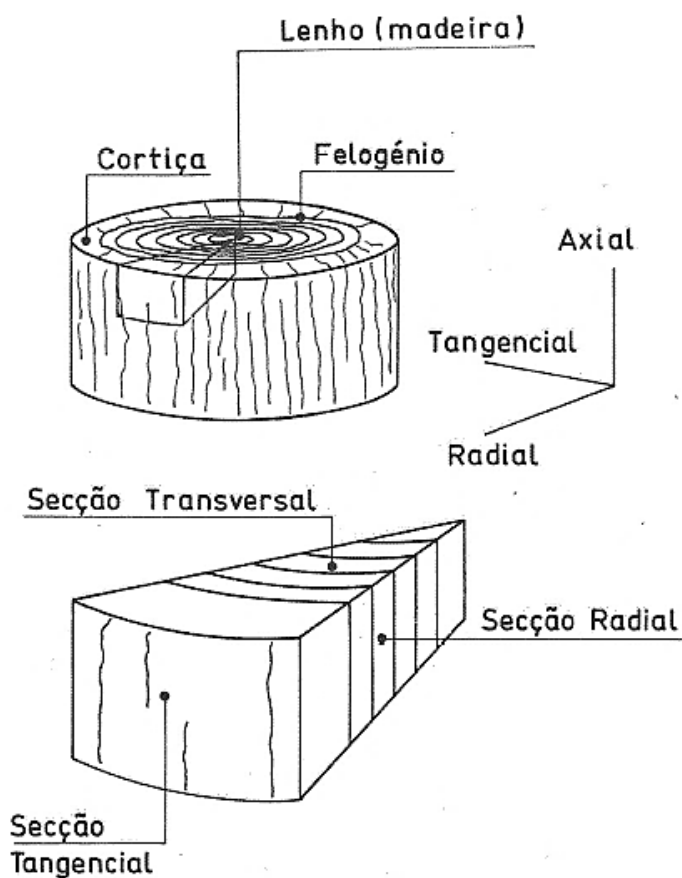


Figura 4 - Principais direções e orientações da cortiça em relação ao tronco do sobreiro [Fortes 2004].

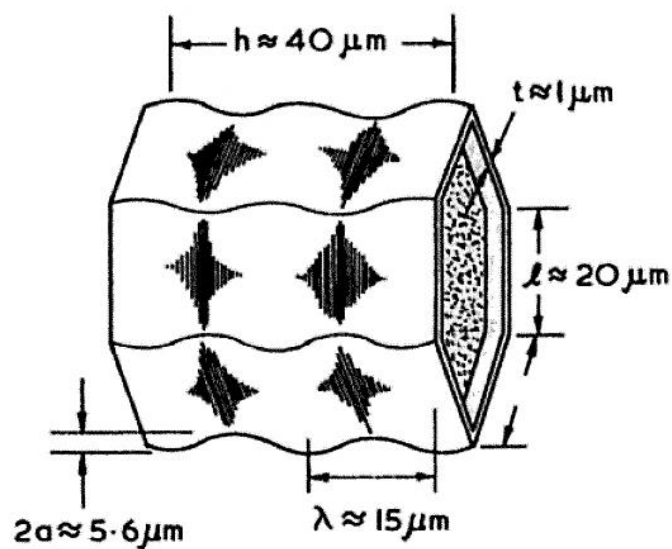


Figura 5 - Célula de cortiça e as suas dimensões [Gibson 1997].

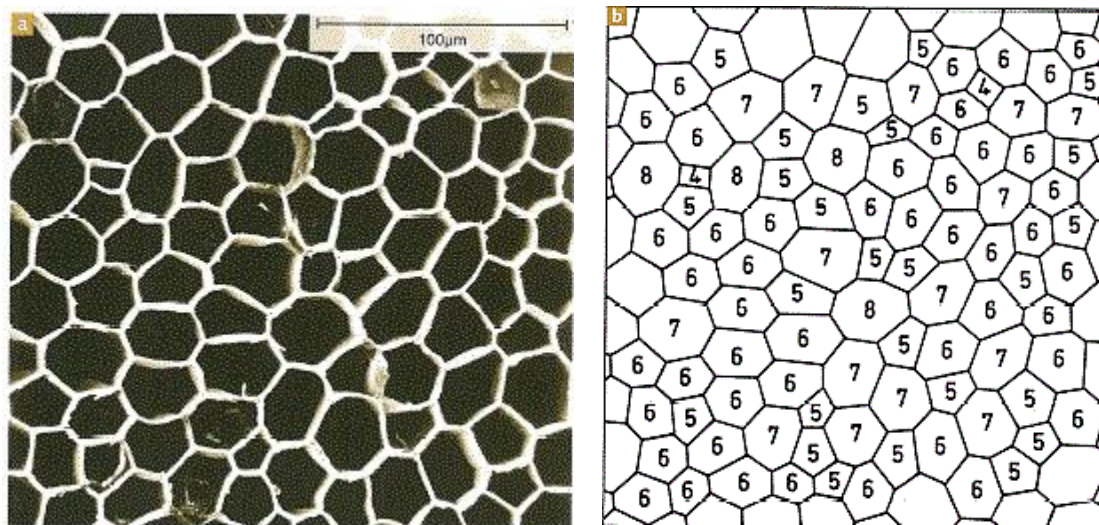


Figura 6 - Secção tangencial de cortiça amadia: (a) imagem obtida por microscopia eletrónica de varrimento, (b) esquema com indicação do número de lados de cada célula [Fortes 2004].

A grande variabilidade de valores da cortiça é justificada pelo facto de este ser um material natural e anisotrópico. Valores muito diferentes podem ser encontrados entre diferentes amostras de cortiça, mesmo que estas pertençam à mesma prancha [Fortes 2004].

1.4 A cortiça: extração e produção

A cortiça é um material celular natural que constitui o revestimento exterior do tronco e dos ramos do sobreiro (*Quercus Suber*). A cortiça é extraída periodicamente da árvore, geralmente de 9 em 9 anos, através de corte e arrancamento de pranchas de cortiça com a espessura adequada ao produto pretendido. Este processo é auxiliado por um machado e designa-se por descortiçamento ou desbóia (Figura 8). A extração da cortiça dá-se frequentemente no final da Primavera ou no Verão.



Figura 7 - Sobreiro [Belchior 2008]



Figura 8 – Desbóia [Fortes 2004]

O sobreiro é uma árvore de crescimento lento e de grande longevidade, podendo viver 250 a 350 anos, embora a idade limite para a produção de cortiça seja 150 a 200 anos. O crescimento radial da árvore, ou seja, o engrossamento do tronco,

ocorre de Março a Outubro, com uma maior taxa de crescimento nos meses de Maio e Junho.

O felogénio é o tecido celular que produz cortiça. O felogénio do sobreiro é muito ativo em sobreiros novos, produzindo uma espessa camada de cortiça a cada ano, e vai reduzindo a sua atividade com o passar das décadas. Este tecido é danificado quando a cortiça é colhida e consequentemente, após a remoção da cortiça este morre. Depois uma nova camada de felogénio, denominada de felogénio traumático, é criada ao fim de 25 a 35 dias e passados 50 dias as primeiras células de cortiça começam a ser produzidas.

A cortiça virgem (Figura 9) é a primeira cortiça produzida pelo sobreiro. É extraída quando a árvore atinge dimensões consideradas pela prática florestal como adequadas para a primeira extração. Essas dimensões são frequentemente alcançadas quando a árvore atinge uma idade compreendida entre 20 a 35 anos. Como este tipo de cortiça apresenta sulcos e fendas profundas, não é adequada ao fabrico de rolhas e é geralmente triturada e aproveitada para a produção de aglomerados. A segunda camada de cortiça produzida por um sobreiro tem a designação de cortiça secundeira. Também esta cortiça não tem potencial para a produção de rolhas devido aos sulcos e fendas que esta apresenta. Os sulcos e fendas são resultado das tensões provocadas pelo acentuado crescimento radial da árvore nos seus primeiros anos. Após a remoção da camada de cortiça secundeira, é finalmente formada uma camada de cortiça de espessura bastante uniforme, com poucas fracturas ou de pequena profundidade. Esta cortiça, designada por cortiça amadia (Figura 9), constitui a matéria-prima para a indústria rolheira.

Resumindo, a cortiça virgem e a secundeira, assim com os desperdícios da amadia são utilizados para a elaboração de grânulos [Pereira 2007].

Tradicionalmente, as rolhas são produzidas a partir de cortiça natural, extraídas de pranchas de cortiça. Este processo produz uma grande quantidade de excedente que é depois triturado e separado automaticamente por granulometria e densidade. Posteriormente, os grânulos são aglomerados no interior de moldes com a adição de poliuretano e catalisadores. Após o processo de cura, que pode ser a frio ou a quente, obtém-se como produto final o aglomerado de cortiça. Atualmente a

cortiça aglomerada (AC) é utilizada num variado conjunto de aplicações, desde quadros de mensagem “memo”, artigos de *design* e vestuário até aplicações arquitectónicas e construção civil, como pisos e isolamentos térmicos. As quantidades de cada tipo de grânulos, assim como quantidades de poliuretano entre outros químicos e tempos de cura são segredos industriais que são o cerne da competitividade das indústrias produtoras de aglomerados de cortiça.

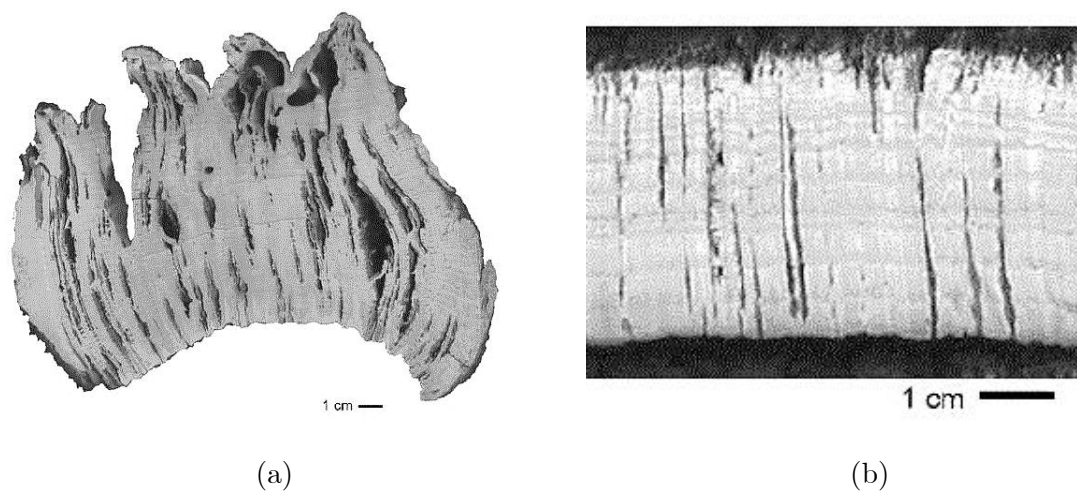


Figura 9 - Cortiça virgem (a) e amadia (b), [Pereira 2007].

A outra variedade de aglomerado testado é o aglomerado de cortiça expandido (EC), vulgarmente conhecido por aglomerado negro de cortiça (Figura 10). O método de produção deste aglomerado foi patenteado em 1892 [Smith 1892], tratando-se de um aglomerado já há muito conhecido. Este, é vulgarmente utilizado para a produção de isolamentos térmicos e juntas de dilatação na construção civil. Para a produção de EC os grânulos são expandidos a temperaturas elevadas com a adição de água, não sendo necessário a adição de aglomerantes ou processo de cura. No entanto continua a haver um constante desenvolvimento de novas misturas e processo de fabrico de aglomerados de cortiça [Claro 2007], assim como soluções inovadoras que incorporam fibras óticas nos aglomerados para que estes sejam translúcidos [Germano 2014]. A agregação é da responsabilidade da suberina naturalmente presente na cortiça [Sousa 2011],

[Silvestre 2008]. A EC apresenta uma densidade inferior à AC, devido ao processo de expansão dos grânulos, e também um tamanho de grão visivelmente superior.



Figura 10 - Aglomerado de cortiça expandida

1.5 Aplicações dos materiais celulares

Os materiais celulares têm sido usados em aplicações de engenharia onde uma boa absorção de energia é necessária. Estes, podem ser sintéticos como o EPP (polipropileno expandido), o EPS (poliestireno expandido) e espumas metálicas ou naturais como a cortiça e a madeira (Figura 11). O melhor material para cada aplicação depende das exigências da aplicação em si. Essas aplicações podem ir de simples empacotamentos de bens até capacetes de bicicleta ou de desportos motorizados. Quando comprimidos, os materiais celulares conseguem manter baixas tensões para grandes deformações antes de alcançarem a densificação. Isto permite-lhes absorver grandes quantidades de energia a tensões relativamente baixas. A maioria destes materiais absorve energia deformando-se permanentemente [Gibson 1997]. Isto significa que depois de um impacto onde altas deformações são atingidas a capacidade do material para voltar a absorver energia é praticamente inexistente. Uma exceção é a cortiça que apresenta viscoelasticidade, ou seja, tem a capacidade de retomar à sua forma original após um impacto [Sousa 2014], [Sousa 2012a], [Sousa 2012b], assim como EVA (Espuma Vinílica Acetinada) entre outros [Mills 2007], [Verdejo 2004]. Esta ocorrência pode-

se verificar, por exemplo, numa rolha de vinho, que pode ser usada inúmeras vezes sem perder as suas propriedades viscoelásticas de forma significativa. Isto significa que a rolha mantém a sua capacidade de ser estanque e impermeável, devido à presença de ceras e da suberina [Fortes 1993]. Este fenómeno poderá implicar que em impactos sucessivos a cortiça tem aproximadamente a mesma capacidade de absorção dos impactos [Coelho 2010].

Antes da proliferação dos materiais celulares sintéticos a cortiça tinha um papel proeminente na absorção de impactos em capacetes militares e desportivos [Popular Science, 1942].

A cortiça natural demonstra uma grande variação na sua resposta mecânica sob compressão uniaxial dependendo da direção (radial, axial e tangencial), da densidade, da porosidade e humidade [Pereira 2014]. Outros fenómenos que podem influenciar o comportamento mecânico da cortiça é a presença de fungos [Pereira 2006].

Como já foi referido, a cortiça natural é um material anisotrópico. Por outro lado, a cortiça aglomerada, devido à distribuição aleatória dos grânulos apresenta um comportamento aproximadamente isotrópico [Claro 2007].

Trabalhos anteriores realizados por Gameiro e Cirne [Gameiro 2007] sugerem que o micro- aglomerado de cortiça pode tornar-se um material inovador adequado para aplicações que exijam baixo custo e baixa densidade, assim como uma elevada capacidade de absorção de energia. Além disso, o microaglomerado de cortiça apresenta uma curva de tensão-deformação semelhante quando comprimido axialmente numa gama de velocidades de deformação a variarem entre 200 s^{-1} e 2500 s^{-1} . Esta propriedade sugere que o microaglomerado de cortiça pode ser um material muito interessante para usar em aplicações onde a sensibilidade à velocidade de deformação é indesejável [Santos 2008].

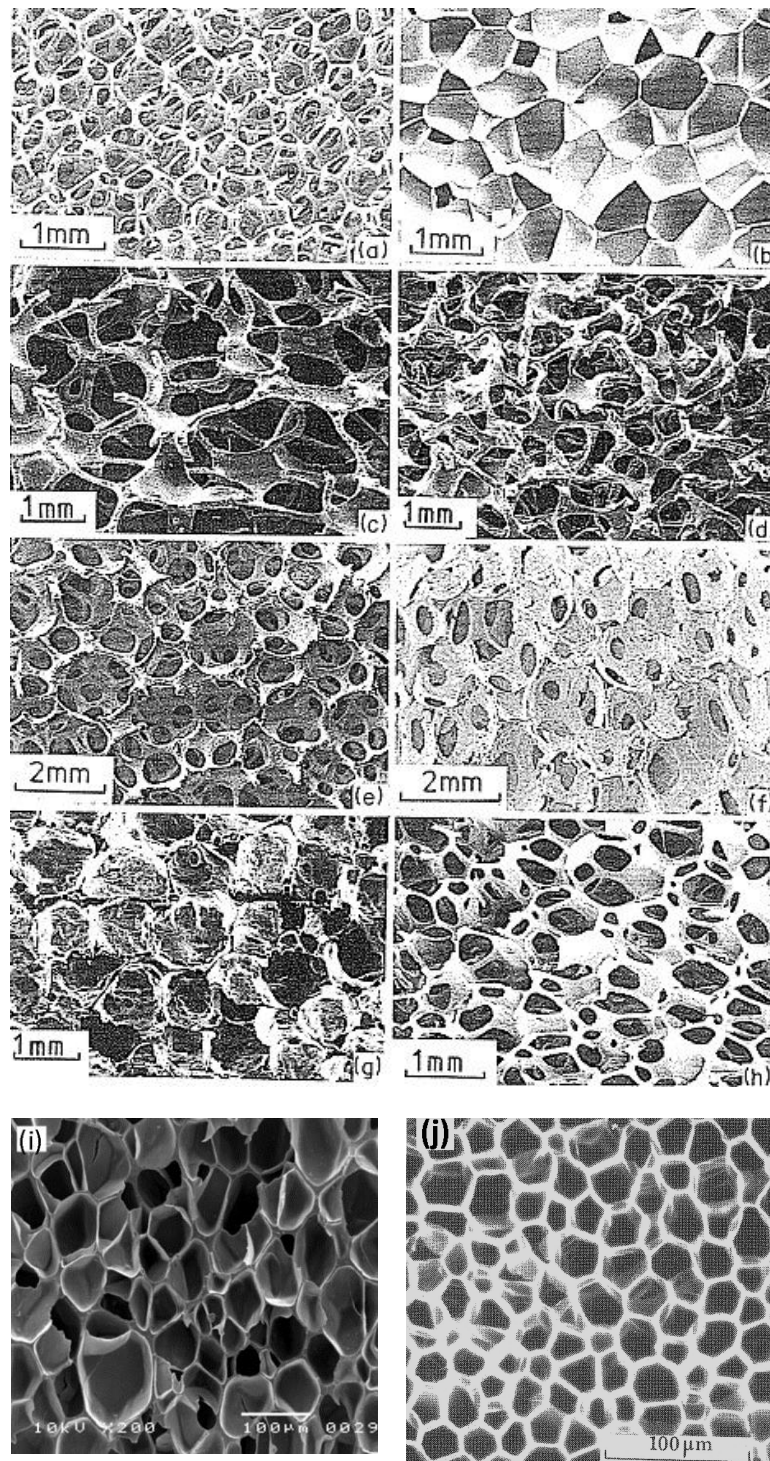


Figura 11 - Microestrutura de materiais celulares: (a) poliuretano de célula aberta, (b) polietileno de célula fechada, (c) espuma de níquel, (d) espuma de cobre, (e) espuma de zircónia, (f) espuma de mulite, (g) espuma de vidro, (h) poliéster de célula aberta e fechada, (i) espuma de EVA, (j) cortiça. a,b,c,d,e,h,i [Gibson1997]; i [Verdejo 2004]; j [Fortes 2004].

A cortiça é um material que nos últimos anos tem revelado um enorme potencial para novas aplicações de engenharia assim como suscitado um grande interesse em vários investigadores devido às suas propriedades mecânicas únicas. Entre essas investigações pode-se referir a adição de 5 % (por volume) de cortiça para melhorar a resistência ao desgaste do asfalto [Oliveira 2013] assim como a produção de compósitos poliméricos de pó de cortiça reforçados com 10 % de fibras naturais de coco. Com a adição das fibras é possível aumentar a tensão de rotura e o módulo de Young em comparação com compósito polimérico de pó de cortiça não reforçado. Esta é também uma excelente solução para acrescentar valor ao pó de cortiça, que usualmente é utilizado para inceneração [Fernandes 2013].

Alcântara *et al.* [Alcântara 2013] desenvolveu um compósito de cortiça com o objectivo de absorver energia em situações de impacto denominada Core-Y e caracterizou as suas propriedades estáticas e dinâmicas. Após ensaios experimentais e simulação por elementos finitos concluiu-se que Core- Y têm uma elevada capacidade de absorção de energia, que pode ser melhorado quando colocado dentro de estruturas tubulares metálicas.

Sousa-Martins *et al.* [Sousa-Martins 2013] submeteu estruturas sanduíche com núcleos compostos de micro aglomerado de cortiça de diferentes densidades e espessuras com peles de alumínio a ondas de choque criadas por cargas explosivas. Concluíram que o aumento de densidade e espessura do núcleo tinham influências positivas na absorção das ondas de impacto. Também Sanchez-Saez *et al.* [Sanchez-Saez 2011] estudaram o comportamento de estruturas sandwich com núcleo de aglomerado de cortiça e peles em alumínio a impactos balísticos. Obtiveram uma absorção de energia cinética do projétil até 30% superior com a utilização de cortiça no núcleo, quando comparada com as placas de alumínio sem qualquer núcleo.

O aglomerado de cortiça foi estudado por Costas *et al.* [Costas 2013] como possível enchimento para um absorsor híbrido de impacto frontal de um carro. Recorrendo a métodos experimentais e de simulação por elementos finitos estudaram o seu comportamento sob cargas axiais estáticas e dinâmicas. Os níveis de absorção de energia específico não foram considerados satisfatórios quando comparado com

outras soluções estudadas pelos autores como compósitos de fibra de carbono e PET (politereftalato de etileno).

Macias-Garcia *et al.* [Macías-García 2003] estudaram a resistência à flexão de aglomerados de cortiça expandida e de compósitos de cortiça expandida com adição de poliuretano e concluíram que a presença de partículas carbonizadas e impurezas (como madeira) no aglomerado diminuem a sua resistência à flexão. Além disso, o aumento da espessura, tamanho das partículas e da quantidade de resina (no caso do compósito de cortiça expandida) contribuem para o aumento da resistência à flexão.

1.6 Motivação e objetivos

Apesar dos recentes desenvolvimentos, ainda não foi efetuado um estudo para caracterizar as propriedades mecânicas dos aglomerados de cortiça em regime estático e dinâmico a baixa velocidade (5 m/s) e alta energia (115 J). A cortiça expandida é normalmente usada para isolamento térmico e em juntas de dilatação. Também tem propriedades mecânicas interessantes quando comparados com os aglomerados de cortiça com baixa densidade (122,9 kg/m³) e alta absorção de energia específica.

Portanto, é possível desenvolver aglomerados específicos consoante a aplicação final. Assim, o objectivo desta dissertação é obter as propriedades mecânicas dos aglomerados de cortiça em resposta dinâmica e quasi-estático e compreender a influência da granulometria, densidade, tipo de ligante e processo de produção nas propriedades mecânicas. Estes dados são úteis na escolha de cortiça para algumas aplicações, como por exemplo, para a camada interior de proteção dos capacetes de motociclo, visando a segurança do condutor em caso de acidente com múltiplos impactos.

Capítulo 2

Procedimentos experimentais

2. Procedimentos experimentais

Neste capítulo são apresentados os procedimentos usados na realização dos ensaios estáticos e dinâmicos. Também se apresentam os resultados obtidos seguidos de uma breve discussão.

2.1 Amostras

Amostras de aglomerado de cortiça

As amostras de cortiça escolhidas para análise foram selecionadas por variarem em densidade, granulometria e processo de fabrico. Na Tabela 1 condensaram-se as variáveis referidas, assim como a sua referência comercial e a referência adoptada ao longo deste trabalho. Também na Figura 13 é possível observar imagens ampliadas dos aglomerados.

As placas de cortiça aglomerada de onde foram retirados os provetes foram fornecidas nas dimensões de 1000x500x60 mm (Figura 12).

Os aglomerados de cortiça testados são produzidos pela empresa Corksribas e os aglomerados de cortiça expandida são produzidos pela Sofalca.



Figura 12 - Placas de aglomerado de cortiça

Tabela 1- Descrição dos aglomerados; PU - Poliuretano; SA - Sem Aglomerante

Referência comercial	Densidade [kg/m ³]	Referência adoptada	Aglomerante	Granulometria [mm]
CK45 RW	216,2	AC216	PU	2 a 4
CK105	157	AC157	PU	2 a 4
CK108	178	AC178	PU	2 a 4
CK115	199,1	AC199	PU	0,5 a 2
Isolamento Puro	122,9	EC122	SA	> 4
HD 9/10 Lbs	159,4	EC159	SA	> 4
HD 11/12 Lbs	182,8	EC182	SA	> 4

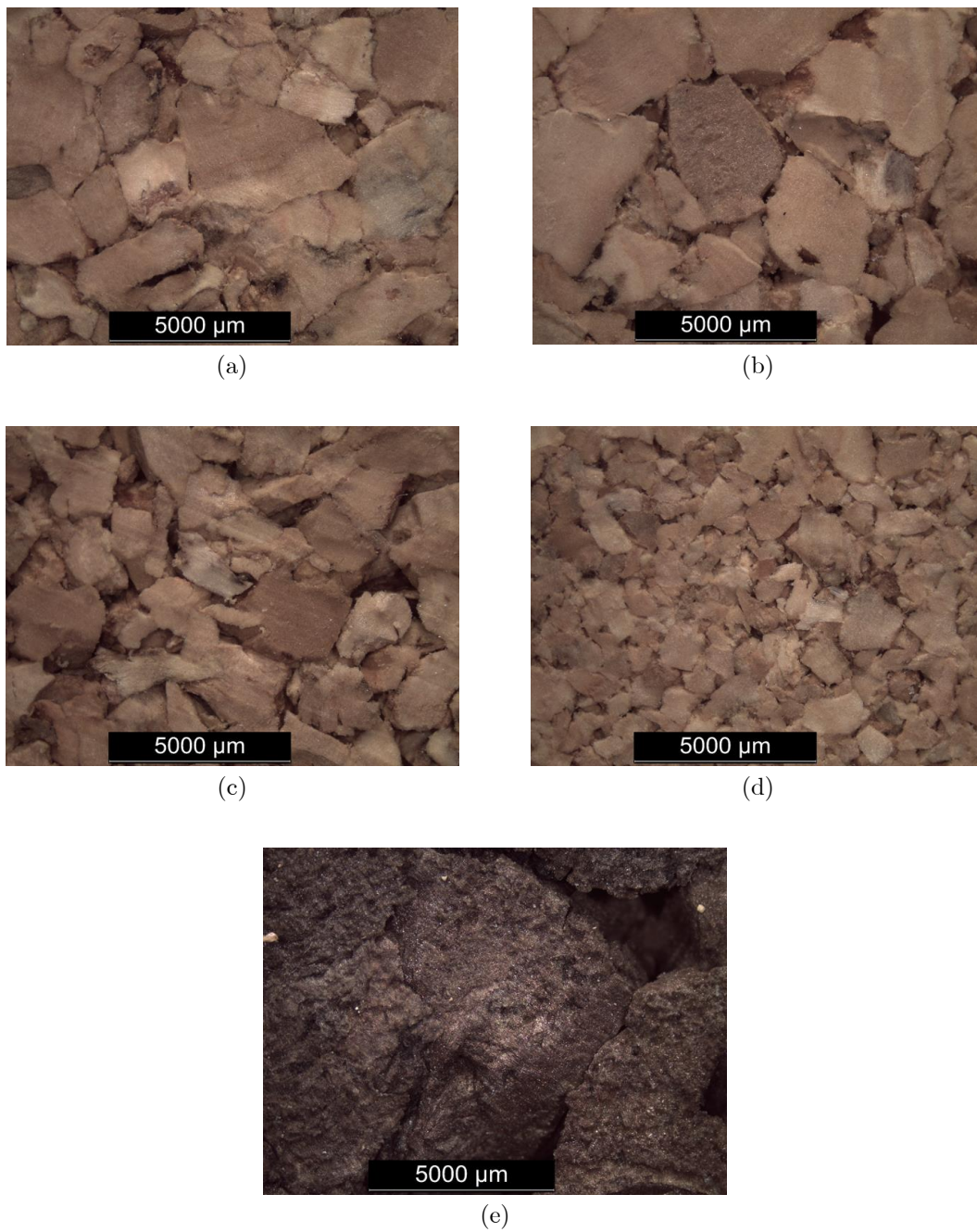


Figura 13 - Imagens ampliadas dos aglomerados. (a) AC216; (b) AC157; (c) AC178; (d) AC199; (e) EC159.

Amostras de EPS e EPP

Por forma a comparar a capacidade de absorção de energia dos materiais celulares naturais com os sintéticos que são os mais utilizados, foram selecionados alguns materiais comerciais para teste, nomeadamente o EPS (polietileno expandido) de 90 kg/m³ por ser um material comum para absorção de impacto [Gibson 1997] e o EPP (polipropileno expandido) de 60 e 90 kg/m³ por ter retorno viscoelástico à semelhança da cortiça. Os materiais celulares sintéticos testados, fornecidos em placas de 120x120x25 mm foram produzidos pela Petibol (Figura 14).

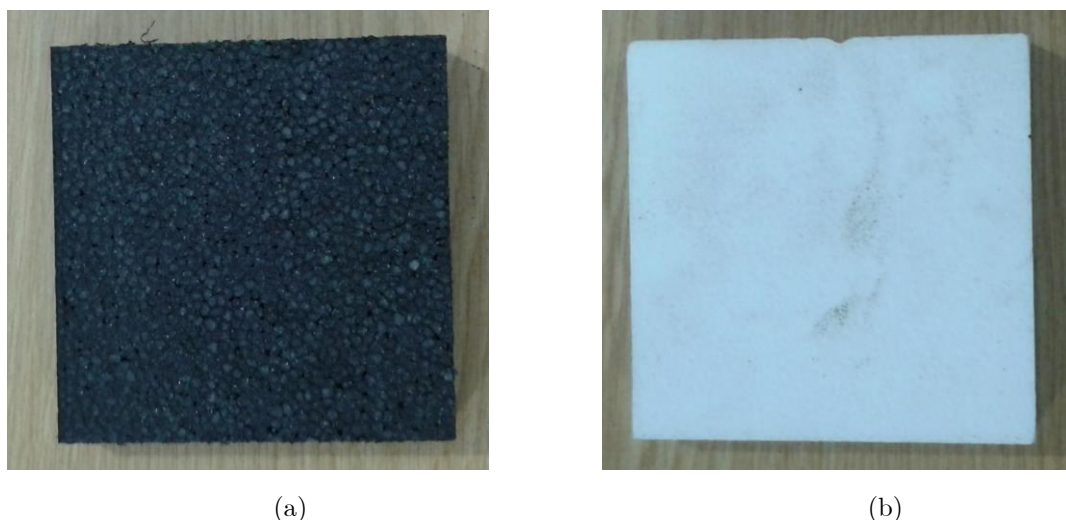


Figura 14 - Amostra de EPP90 (a) e EPS90 (b).

2.2 Ensaios estáticos

Preparação dos ensaios

Para a realização do ensaios de compressão não foi seguida nenhuma norma por não haver nenhuma específica para os aglomerados de cortiça. Os ensaios de compressão estáticos foram realizados na máquina universal Shimadzu AG50KNG

(Figura 16) à velocidade de 5 mm/min em pelo menos 5 provetes de cada tipo. Os instrumentos de medida de deslocamento imposto ao provete foram de dois tipos: (i) régua ótica da própria máquina e, (ii) videoextensómetro Messphysik ME46NG (Figura 15). Naturalmente, no 1º caso, a leitura obtida é referente ao travessão da máquina de ensaios. Assim, toda a natural deformação elástica da estrutura do equipamento, onde se incluem todos os sistemas de suporte até ao provete, é adicionada, como erro de medida, ao valor da indicação do deslocamento dado pela máquina. Já o videoextensómetro permite medir diretamente do próprio provete, pelo que, em princípio, seria um método mais rigoroso. No entanto, analisado o material que está a ser testado, é fácil verificar que durante a deformação por compressão, há grãos superficiais que se destacam naturalmente, facto que, como se verá mais à frente, poderá comprometer a medição com videoextensómetro.

A equação 2.1 apresenta a definição de coeficiente de Poisson, onde ε_x e ε_y são as deformações transversais e ε_z é a deformação longitudinal. Para obter a curva do coeficiente de Poisson ao longo de um ensaio de compressão, é necessário medir, simultaneamente, o deslocamento nos eixos transversal e longitudinal. Ora a régua de medida da máquina, anteriormente indicada, só dá a evolução do eixo vertical. Posto isto, o videoextensómetro foi o instrumento de medida escolhido para este efeito.



Figura 15 - Videoextensómetro



Figura 16 - Shimadzu AG50KN.

$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \quad (2.1)$$

A Figura 17 mostra a fotografia de um provete em ensaio com videoextensómetro. As marcas, círculo preto impresso em papel branco recortado e colado no provete, são continuamente acompanhadas pelo sistema do videoextensómetro, pelo que, no final do ensaio é recolhido um ficheiro com as coordenadas cartesianas dos quatro pontos que, por sua vez, darão origem às duas deformações, em função do tempo. De facto, este ficheiro não apresenta o valor da força exercida durante o ensaio. Assim, no final, há dois ficheiros; um com a evolução da carga ao longo do tempo (obtido a partir da máquina de ensaios universal) e o outro anteriormente indicado. Torna-se portanto necessário cruzar os dados, carga e coordenadas dos quatro pontos, em termos temporais e só assim se obterá, finalmente uma curva

tensão-deformação. Este é um processo relativamente simples pois é realizado com auxílio de uma macro, *dotmeas*, em excel, desenvolvida em trabalhos anteriores [Araújo 2013]. Inicialmente os ensaios eram para ser todos realizados com videoextensómetro, pois assim seria possível obter todas as propriedades mecânicas do provete, incluindo a curva tensão-deformação e o coeficiente de Poisson. No entanto, com particular relevo nos provetes de aglomerado de cortiça, se por um mero acaso, uma das quatro marcas óticas (Figura 17) estivesse posicionada sobre um grão que se destacasse, o resultado era a perda dos valores das coordenadas do respectivo ponto e, portanto, a inutilização dos resultados. Assim, foi imprescindível adotar os dois métodos de medição indicados: videoextensómetro para deformações relativamente pequenas, pois nessa situação as marcas óticas estão bem fixas e régua ótica da máquina para obter as curvas tensão-deformação.

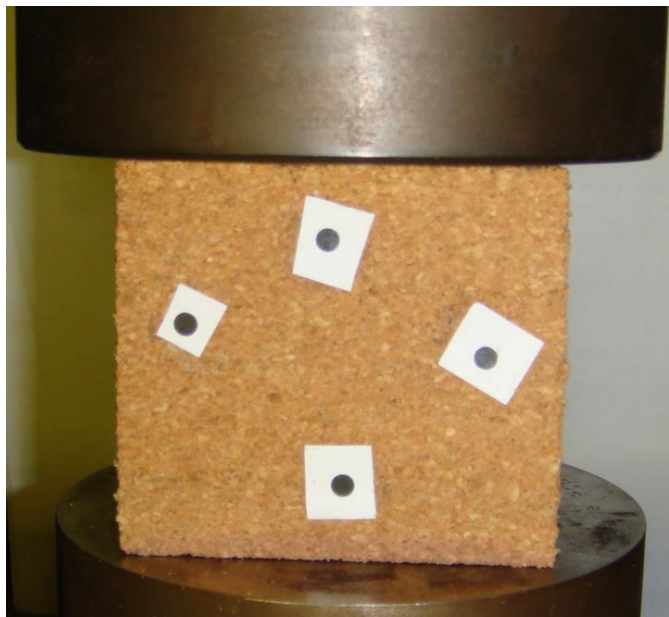


Figura 17 - Ensaio de compressão uniaxial.

O erro introduzido por este segundo sistema de medição foi, no entanto, minimizado. Para tal, foi medida a flexibilidade, C , da máquina de ensaios, incluindo todas as peças até ao provete, e descontado o seu valor nos deslocamentos apresentados no ficheiro de resultados. A flexibilidade é o inverso da

rigidez da máquina e é obtida através do ensaio, base de suporte contra punção de carga, sem o provete. Foram então efetuados cinco ensaios, sem o provete, e calculada a média do declive da reta inicial da curva carga-deslocamento, assim obtida, na zona elástica e na mesma gama de cargas dos ensaios, com provete. A Figura 18 mostra a curva obtida, sem provete, com um valor de $C=9 \times 10^{-6}$ mm/N. O deslocamento real, d_{real} , nos ensaios com provete é calculado por

$$d_{real} = d - C \times P \quad (2.2)$$

onde d e P são o deslocamento e a carga indicados no ficheiro de resultados, respetivamente.

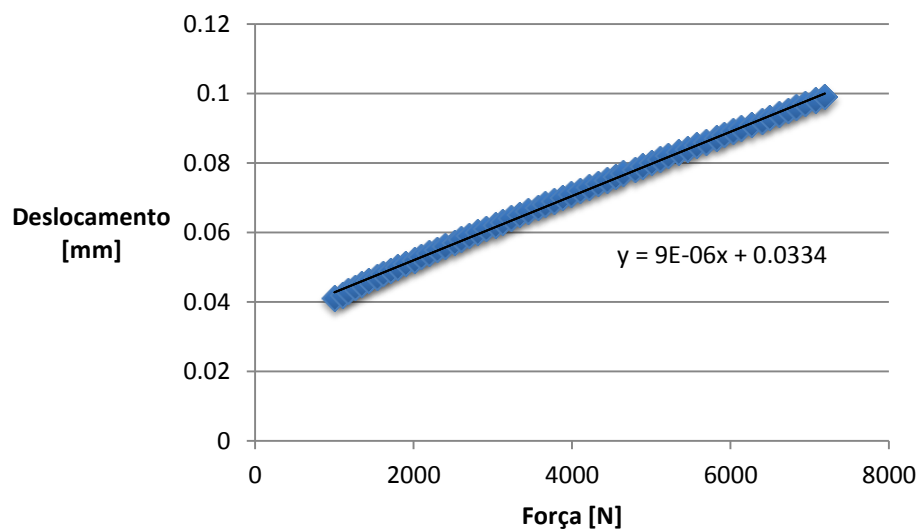


Figura 18 - Gráfico deslocamento-carga da máquina de ensaios

As amostras de aglomerado de cortiça foram cortadas a partir das placas fornecidas com o auxílio de uma serra de fita nas dimensões 60x60x60 mm. Já as amostras de EPPE EPS, devido às dimensões das placas disponibilizadas, foram cortadas com as dimensões 25x25x50 mm (largura x profundidade x altura). Durante os ensaios teve-se em atenção a possibilidade de ocorrer encurvadura nos provetes, o que não se verificou. Para tal, houve o cuidado de garantir, através de

inspeção visual, o correto alinhamento da placa aquando do corte, de forma a garantir o paralelismo entre faces opostas e perpendicularidade entre arestas concorrentes. No final mediu-se os provetes para apurar a sua verdadeira dimensão com o auxílio de um paquímetro de precisão $\pm 0,05$ mm.

Procedeu-se em todos os ensaios, através de inspeção visual, ao correto posicionamento dos provetes no centro da base de suporte, bem como o paralelismo entre a base de suporte e o punção.

Uma vez que se pretende medir grandes deformações, optou-se por utilizar a deformação real. A deformação real, ε_r , é definida como

$$\varepsilon_r = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.3)$$

Onde ε é a deformação convencional dada pela relação da variação do comprimento com a medida inicial. Esta definição de deformação é a mais apropriada para medir grandes deformações, pois tem em consideração todo o percurso da deformação realizado.

É previsto que os aglomerados de cortiça apresentem um coeficiente de Poisson próximo de zero, à semelhança da cortiça natural [Fortes 1989]. Como tal, é correto assumir que a área da secção transversal à direcção de compressão do ensaio uniaxial é constante. Consequentemente, escolheu-se usar a tensão nominal, σ , ao invés da tensão real (equação 2.4).

$$\sigma = \frac{\text{Força}}{\text{Área da secção}} \quad (2.4)$$

Resultados

A Figura 19 apresenta o comportamento à compressão dos aglomerados testados. Como previsto e evidenciado na Figura 3, existe uma tendência para os aglomerados mais densos terem um módulo de Young mais elevado, uma tensão de patamar (*plateau*) superior e também a densificação ocorrer para deformações mais baixas. No entanto existem algumas exceções. Apesar do aglomerado mais denso

(AC216) e do menos denso (EC122) apresentarem o comportamento previsto, os aglomerados de densidade intermédia apresentam algumas disparidades. Este fenómeno, poderá ter vários factores que o influenciam, como o processo de fabrico (aglomerado vs. aglomerado expandido), a granulometria, a quantidade de aglomerante, entre outros. Por exemplo, as curvas dos aglomerados AC157 e AC178 são praticamente coincidentes. Isto pode ser causado pela proporção da mistura dos grânulos ou pela quantidade de aglomerante. Também o aglomerado EC159 apresenta valores de tensão superiores ao aglomerado EC182 para os mesmos valores de deformação, contrariando o previsto. Esta ocorrência, pode ser explicada pela presença de uma quantidade considerável de madeira carbonizada visivelmente presente na EC182, fazendo com que esta apresente uma maior densidade e uma degradação das suas propriedades mecânicas.

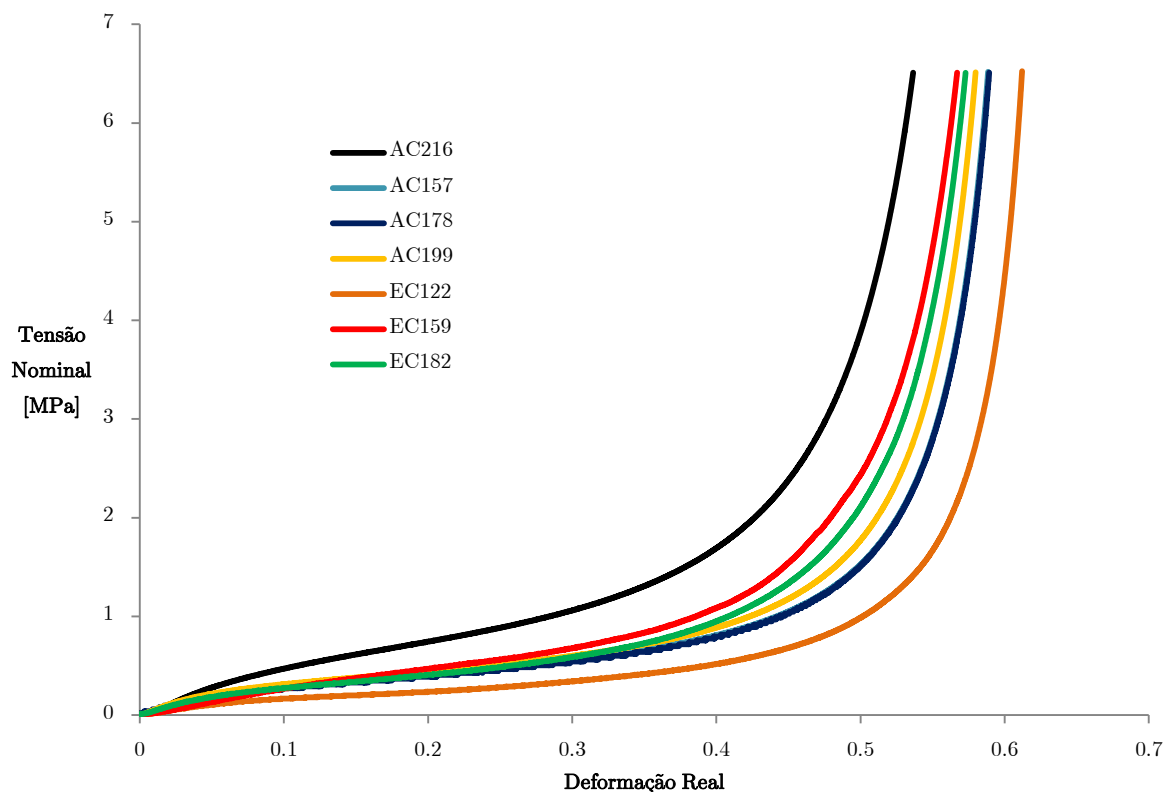


Figura 19 - Curva tensão-deformação dos aglomerados de cortiça.

Para um melhor entendimento do comportamento de materiais celulares naturais face a sintéticos são apresentados na Figura 20 três aglomerados de cortiça e os três materiais celulares sintéticos testados. Como se pode observar, os materiais sintéticos apresentam um módulo de Young superior aos aglomerados de cortiça. Isto permite que, para menores deformações, estes já se encontrem na região de patamar. Também a tensão do patamar apresenta um declive menor e a densificação ocorre para deformações superiores quando comparado com os aglomerados de cortiça.

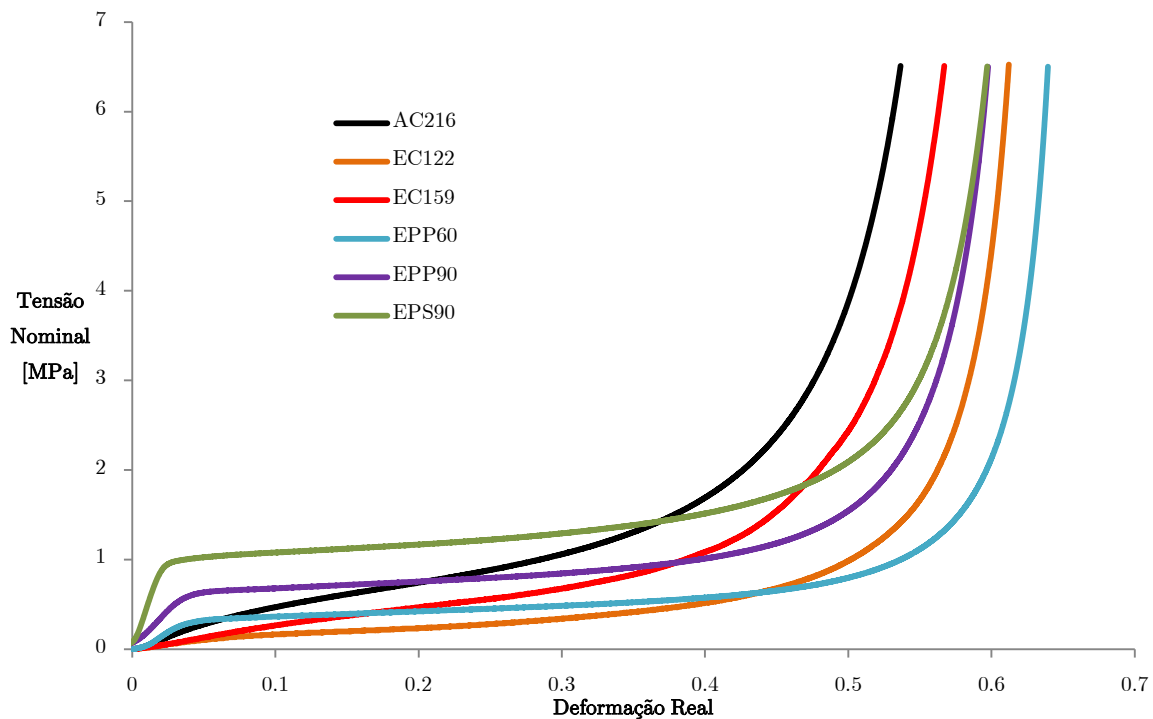


Figura 20 - Curva tensão deformação espumas sintéticas e aglomerados de cortiça.

A Figura 21 apresenta o valor médio e respetivo intervalo de dispersão do módulo de Young medido experimentalmente para as amostras dos aglomerados de cortiça, naturalmente apurado através do cálculo do declive na região linear elástica. Já a Figura 22 apresenta o valor médio e respetivo intervalo de dispersão do módulo de Young das espumas sintéticas, tendo como referência o aglomerado AC216.

O fator de maior influência do módulo de Young é a densidade relativa. Quando analisados somente os aglomerados de cortiça evidencia-se esta relação. A amostra AC157 revela-se como a única exceção. Esta ocorrência, mais uma vez, poderá se dever a diversos fatores como a granulometria, quantidade de aglomerante, entre outros.

Quando comparado o aglomerado de cortiça com maior módulo de Young (o AC216) com os materiais sintéticos, verifica-se que estes últimos, apresentam um módulo de Young muito superior, apesar de terem densidades mais baixas.

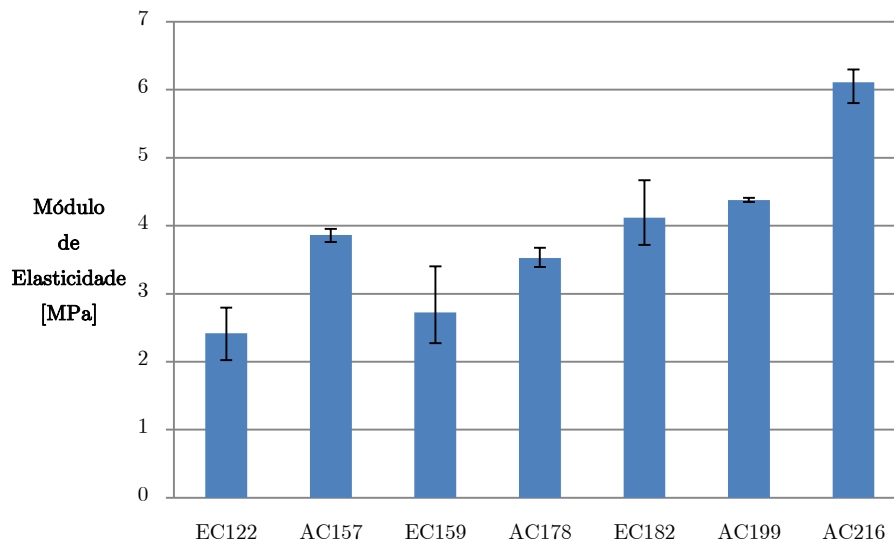


Figura 21 – Valores médios e intervalos de dispersão do módulo de Young dos aglomerados de cortiça.

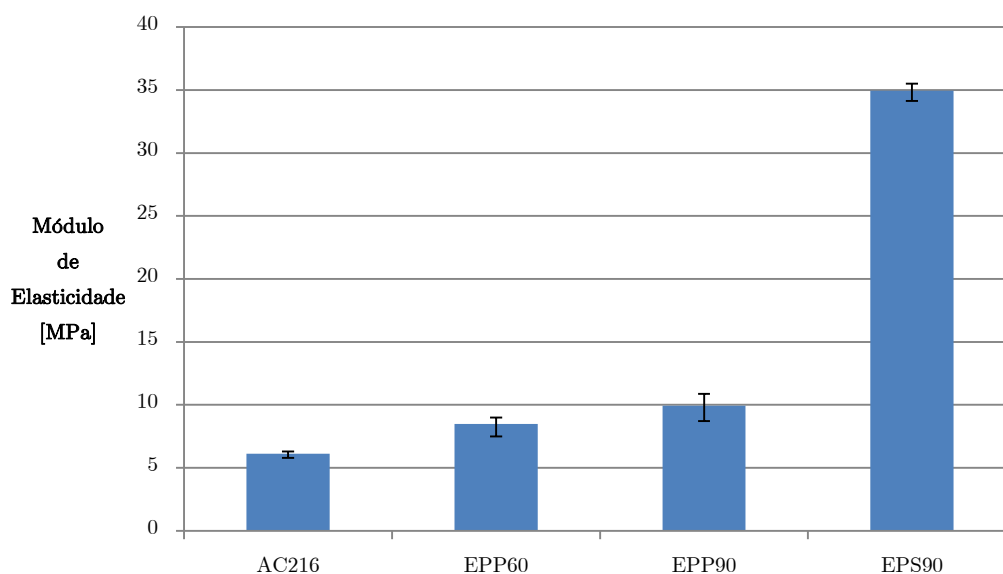


Figura 22 – Valores médios e intervalos de dispersão do módulo de Young das espumas sintéticas vs. aglomerado de cortiça.

Com o objetivo de melhor caracterizar os aglomerados de cortiça foi também analisado o coeficiente de Poisson, apesar de já haver um estudo semelhante realizado por Fortes e Nogueira [Fortes 1989], que no entanto se focava somente na cortiça natural.

Este tipo de análise apresenta algumas dificuldades. O deslocamento transversal em materiais com baixo coeficiente de Poisson é muito baixo, mesmo próximo de zero, podendo facilmente ser negativamente influenciado pela resolução na ordem dos 5 μm do videoextensómetro, assim como pela heterogeneidade nas propriedades mecânicas inerente a materiais de origens natural e ainda pelos motivos já indicados no início desta secção. Assim, por motivos de clareza de apresentação dos resultados, foram estudados apenas três aglomerados de cortiça. A Figura 23 apresenta a evolução do coeficiente de Poisson ao longo da deformação longitudinal imposta.

No domínio do regime linear elástico, o valor do coeficiente de Poisson é próximo de 0,15. Com o aumento da deformação, o valor do coeficiente diminui, em particular nos aglomerados de cortiça que não são expandidos, esta dá-se de forma

abrupta. Para maiores deformações, já próximas da densificação, o coeficiente começa lentamente a aumentar. No aglomerado EC182 não é visível esse aumento, uma vez que não foi possível efetuar com sucesso os ensaios mecânicos para grandes deformações neste aglomerado. No entanto, é expectável que o coeficiente aumentasse para deformações próximas da densificação

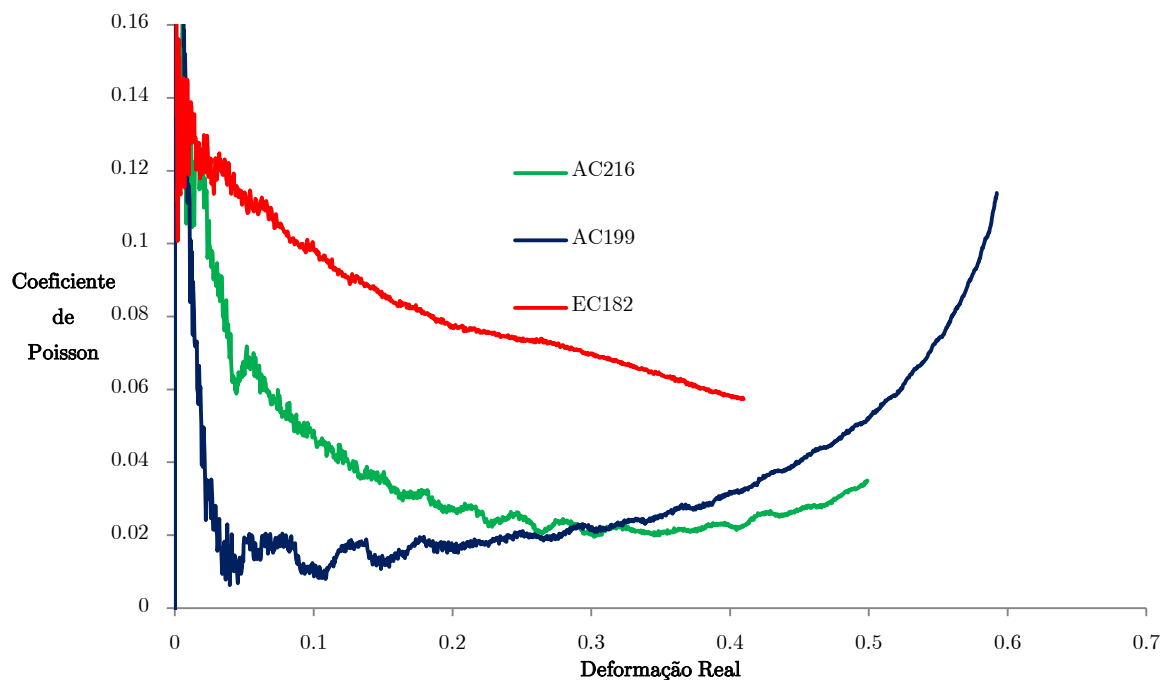


Figura 23 - Coeficiente de Poisson.

2.3 Ensaio dinâmico

Preparação dos ensaios

Para a realização dos ensaios dinâmicos utilizou-se uma torre de queda construída para o efeito. Esta consiste num tubo na vertical com 3 metros de altura, que tem como propósito guiar o impactor que se desloca no seu interior. O impactor atinge em média uma velocidade de 4,8 m/s antes do impacto, devido a atritos internos.

Este é fabricado em aço e apresenta uma geometria na zona de impacto hemisférica de diâmetro 94 mm e uma massa que variou entre 5 e 10 kg. No interior do impactor localiza-se um acelerómetro uniaxial Measurement Specialties 1201 alinhado com o eixo do impacto. Próximo da zona de impacto encontram-se 2 sensores refletos de objetos (OPB700ALZ) distanciados entre si de 15 mm com o propósito de medir a velocidade de impacto. Estes sensores encontram-se ligados a uma carta de aquisição de dados DT 9816 com uma velocidade de aquisição de 3000 Hz. A estrutura de suporte da amostra consiste num bloco maciço de aço. A Figura 24 apresenta em pormenor zona de impacto. O segundo impacto foi efectuado ao fim de aproximadamente um minuto do primeiro impacto.

Posteriormente, os dados relativos à velocidade e a curva de aceleração foram analisados recorrendo ao MATLAB.

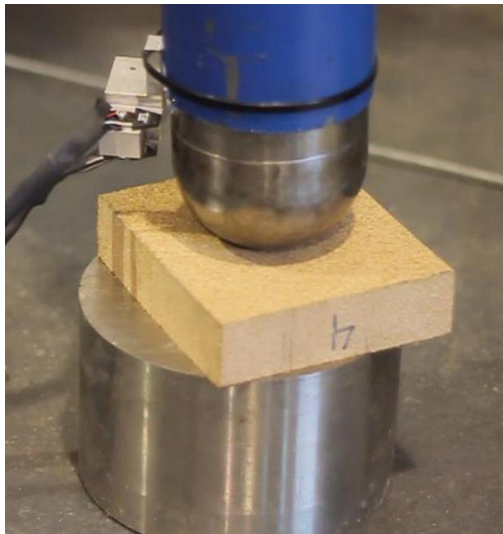


Figura 24 - Pormenor da torre de queda.

Resultados

A partir do equipamento utilizado foi possível obter as curvas de aceleração ao longo do tempo. Estas curvas permitem perceber se a desaceleração se dá de uma

forma suave, com a curva a apresentar uma variação do declive gradual, ou de forma abrupta, onde a variação de declive da curva é repentina.

Existem funções que permitem estudar a influência da forma da curva de aceleração, como por exemplo o HIC (head injury criterion) proposto por Gurdjian *et. al.* [Gurdjian 1966.] Esta função é utilizada pela norma ECE R22.05 como um dos critérios para a validação de capacetes de motociclos. No entanto, para o presente trabalho, apenas se considerou o valor máximo de aceleração medido para cada amostra, assim como o aumento percentual do valor máximo de aceleração do primeiro para o segundo impacto.

Após o primeiro impacto as amostras tinham tendência para se deslocarem da sua posição inicial. Como tal, tomou-se especial cuidado para colocar as amostras alinhadas com o impactor para que o segundo impacto se desse na mesma zona do primeiro.

Para facilitar a interpretação das curvas de aceleração, dispôs-se a curva do segundo impacto de seguida ao primeiro impacto no mesmo gráfico. Também propositadamente não se colocaram os picos dos impactos alinhados. Apesar de a forma escolhida não facilitar a leitura relativa da altura dos picos, simplifica a visualização da forma da curva de aceleração.

Impactor de 10 kg

Na Figura 25 é possível verificar o comportamento da curva de aceleração do impactor para as diferentes amostras. Escolheu-se apresentar uma curva que se considerou representativa do comportamento de cada tipo de aglomerado. No entanto é necessário ter em consideração que tratando-se de materiais naturais, estes apresentam alguma dispersão de valores.

De imediato sobressai o facto dos valores do segundo impacto serem superiores ao primeiro. Este acontecimento deve-se a deformações plásticas que ocorrem no material. Estas deformações degradam as propriedades dos aglomerados do ponto de vista de absorção de impactos.

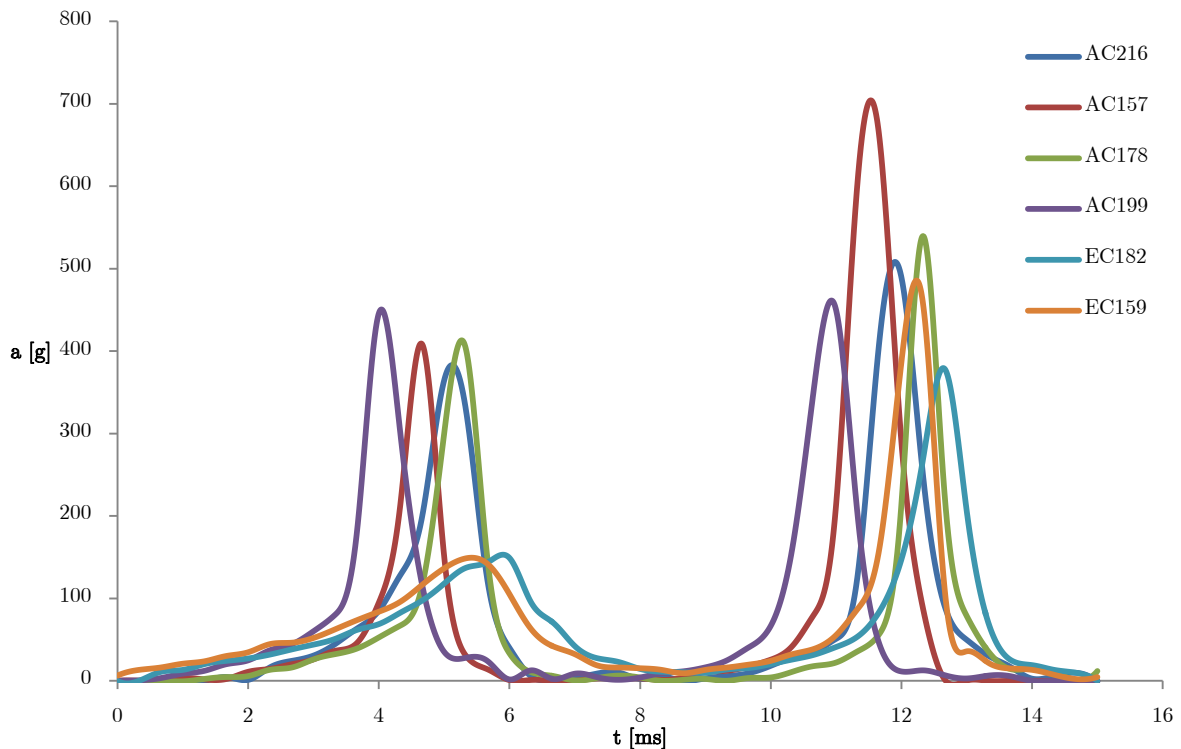


Figura 25 - Curvas de aceleração para o impactor de 10 kg.

A cortiça natural tem um comportamento viscoelástico que se verifica para uma grande gama de deformações. No entanto para deformações dentro da zona de densificação, ocorre alguma deformação plástica, onde a deformação é de tal forma elevada que as paredes celulares não têm mais a capacidade de voltar à sua posição original. Este mesmo comportamento pode-se esperar nos aglomerados de cortiça. Também se verifica que os aglomerados de cortiça expandida apresentam os valores mais baixos de pico de aceleração para o primeiro impacto e são também os que apresentam maior aumento percentual do valor máximo de aceleração do primeiro para o segundo impacto. Apesar do grande aumento percentual apresentam também o valor mais baixo de aceleração para o segundo impacto.

Já o aglomerado AC199, que se trata do aglomerado com menor tamanho de grão, apresenta um baixo aumento do valor de pico de aceleração do primeiro para o segundo impacto. Pode-se depreender que poderá existir uma relação entre o

tamanho de grão e a degradação das propriedades mecânicas para absorção de impacto, onde quanto maior o tamanho de grão, maior é a degradação das propriedades mecânicas. Vários fenómenos poderão influenciar este acontecimento. Uma das possíveis justificações é que quanto maior o tamanho de grão, menor é a quantidade de superfície de grãos para se ligarem entre si para um mesmo volume. Assim, com um tamanho de grão menor é possível obter uma maior área de contacto e uma maior força de aglomeração. Particularmente para o caso dos aglomerados de cortiça expandida, o facto do aglomerante ser a suberina naturalmente presente na cortiça ao invés do poliuretano amplamente utilizado para a produção de aglomerados de cortiça, poderá ter influência. Também o processo de expansão, no caso dos aglomerados de cortiça expandida, poderá enfraquecer as paredes celulares implicando uma maior degradação das propriedades mecânicas no que concerne à absorção de impactos.

A Figura 26, permite saber com exatidão o valor de aceleração médio medido para o primeiro e segundo impacto e a Tabela 2 dá o aumento percentual do valor do pico de aceleração. Este aumento percentual pode ser considerado como uma forma quantitativa de avaliar a degradação das propriedades mecânicas dos aglomerados.

Num material que se pretende que tenha a capacidade de suportar múltiplos impactos, é conveniente que a degradação de propriedades seja a menor possível. Apesar de, para uma análise de duplo impacto os aglomerados de cortiça expandida tenham um comportamento superior aos aglomerados de cortiça, esta afirmação poderá não ser verdadeira.

No ensaio preliminar realizado ao aglomerado EC122 verificou-se que apesar de este suportar o primeiro impacto (338,7 g), o seu estado de degradação após o ensaio era demasiado elevado para se poder efetuar um segundo ensaio sem pôr em risco o material (acelerómetro) utilizado para os testes. Também não se testou o EPP60, o EPP90 e o EPS90.

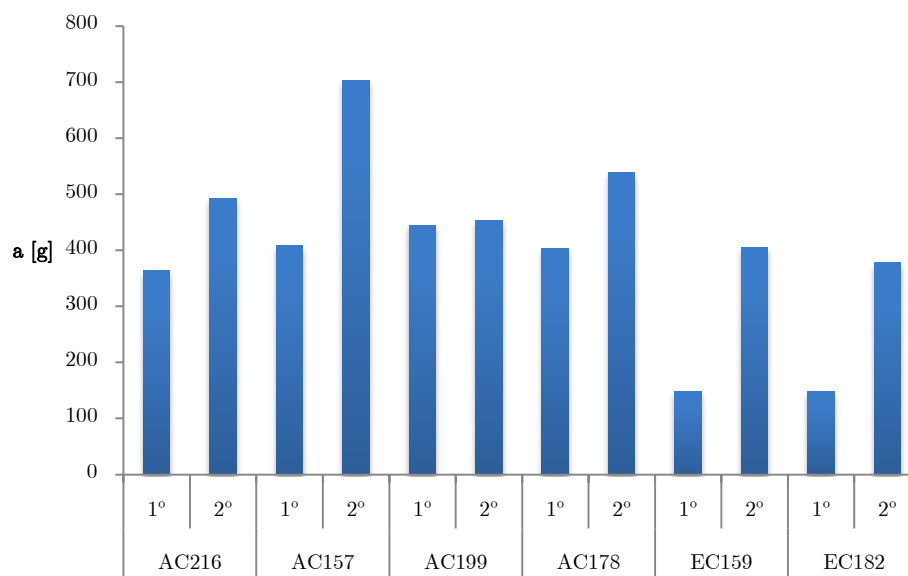


Figura 26 - valor de aceleração médio do pico para o impactor de 10 kg.

Tabela 2 - Aumento percentual dos valores médios do pico de aceleração para o impactor de 10 kg.

Material	Aumento do valor de pico (em %)
AC216	35,4
AC157	72,4
AC199	1,7
AC178	33,6
EC159	172,4
EC182	154,6

Impactor de 5 kg

As amostras testadas pelo impactor de 5 kg foram a AC216, a AC199, A EC159, o EPP60, o EPP90 e o EPS90. Ou seja, escolheram-se três aglomerados de cortiça representativos dos sete testados e três materiais celulares sintéticos. O objetivo

deste ensaio foi, sobretudo, recolher dados para se poder comparar o comportamento dos materiais celulares naturais vs. materiais sintéticos.

Na Figura 27 encontra-se em falta a parte respectiva ao segundo impacto do EPP60, pois a leitura da primeira amostra ao segundo impacto foi superior a 1000 g, que é o limite do acelerómetro. De forma a não se correr o risco de danificar o acelerómetro não se efetuaram os restantes segundos impactos para o EPP60, de onde se pode depreender que todos terão um valor de pico superior a 1000 g.

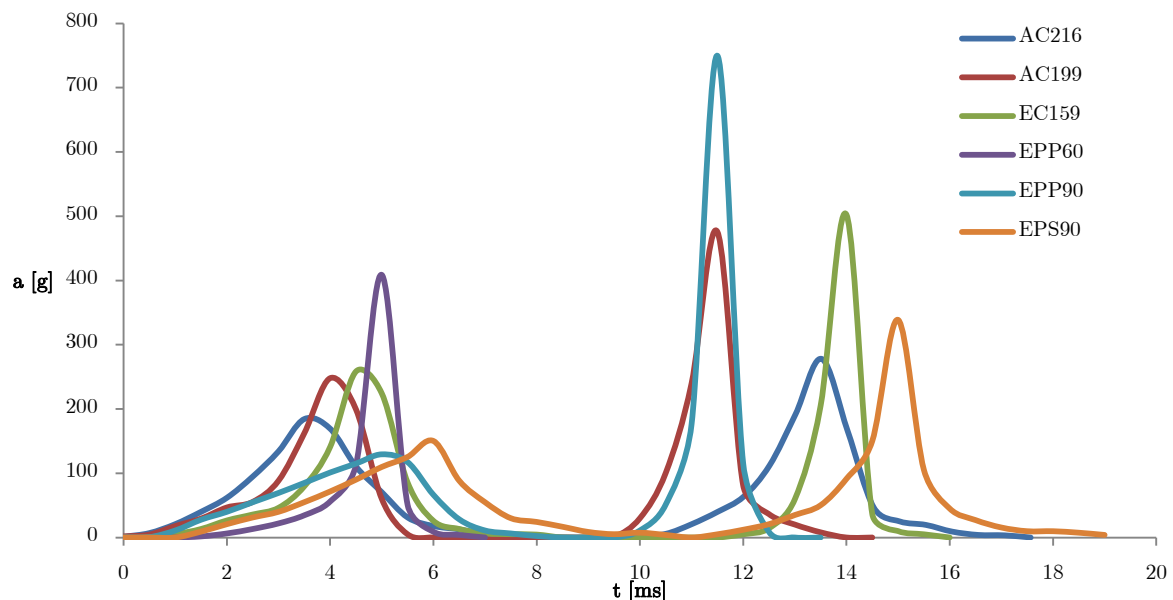


Figura 27 - Curvas de aceleração para o impactor de 5 kg.

Através da Figura 28 e da Tabela 3 verifica-se que os materiais sintéticos apresentam a maior degradação de propriedades. Apesar de se verificar visualmente que o EPP apresenta retorno viscoelástico à semelhança da cortiça, essa propriedade não lhe traz vantagem em relação ao EPS, que tem um processo de deformação perfeitamente plástico fora da zona linear elástica, no que concerne à degradação de propriedades ao impacto para este tipo de ensaio.

Quando se comparam os aglomerados de cortiça testados comuns aos dois ensaios começa-se por verificar que a degradação das propriedades do AC216 mantem-se

praticamente inalterada. Pode-se depreender que o aglomerado AC216 é uma boa escolha para aplicações com uma grande variação de energias de impacto. Por outro lado, o aglomerado AC199 que para o impactor de 10 kg tinha apresentado uma degradação de propriedades muito baixa (1,7%), no ensaio com o impactor de 5 kg apresenta uma degradação de 85,4%. Mais uma vez, isto pode ser devido aos fatores anteriormente mencionados (processo de produção, granulometria, densidade,...). É curioso verificar que apesar das diferenças nas massas dos impactores (5 e 10 kg), o valor máximo obtido para o segundo impacto foi igual em ambos. Ainda o aglomerado EC159 apresenta um acentuado decréscimo na degradação das propriedades com a diminuição da massa do impactor. Daqui pode-se depreender que o aglomerado de cortiça expandida é mais apropriado para baixas energias de impacto.

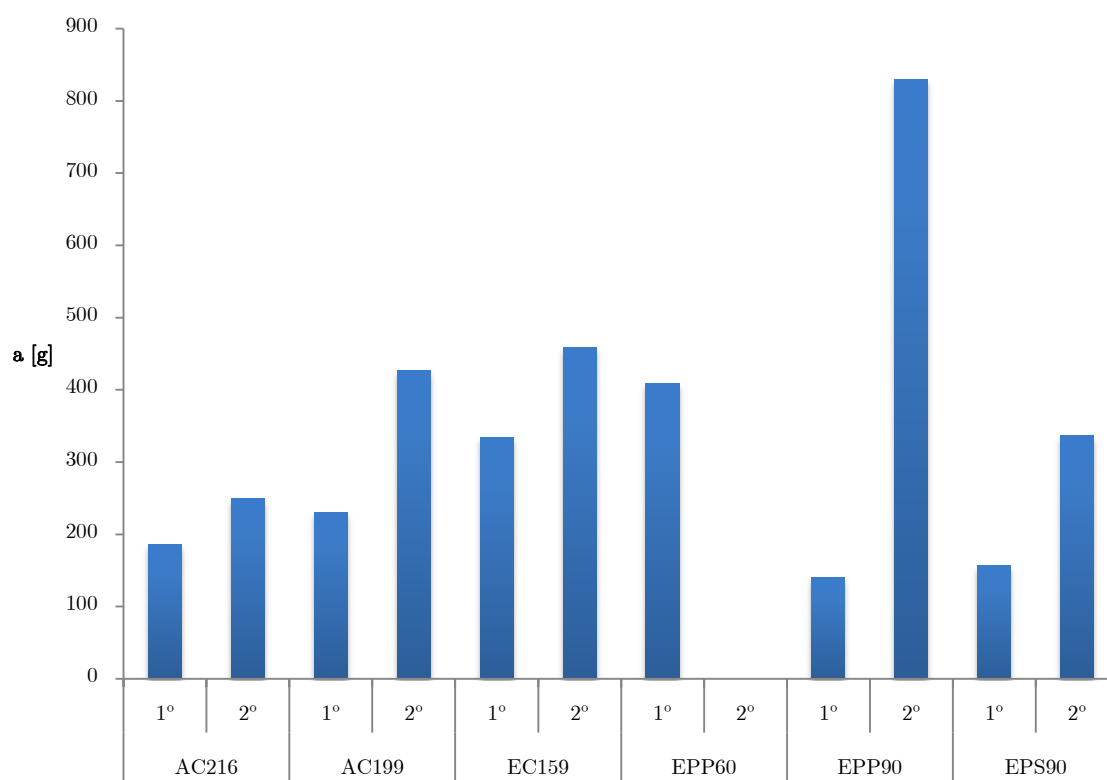


Figura 28 - valor de aceleração médio do pico para o impactor de 5 kg

Tabela 3 - Aumento percentual dos valores médios do pico de aceleração para o impactor de 5 kg

Material	Aumento do valor de pico (em %)
AC216	34,3
AC199	85,4
EC159	37,1
EPP60	não aplicável
EPP90	491,5
EPS90	114,6

2.4 Discussão de resultados

Após a realização de algum processamento sobre os dados obtidos mais conclusões se podem inferir. Cingindo-se unicamente aos aglomerados de cortiça, sobre o gráfico da Figura 29 com as curva tensão-deformação começou-se por assinalar os pontos correspondentes para cada curva a uma energia absorvida de 250, 500 e 750 kJ/m³. Esta energia absorvida não é mais do que a energia cinética (neste caso do punção da máquina de ensaios de compressão) transformada em energia viscoelástica [Gibson 1997]. Depois com uma linha de tendência ajustou-se um segmento de recta que melhor passava pelos pontos correspondentes a cada um dos níveis de energia seleccionados. Verificou-se que havia uma grande correlação entre a linha de tendência e os pontos seleccionados. Constata-se que o factor predominante no comportamento dos aglomerados é a sua densidade.

Este tipo de gráfico permite otimizar a seleção do aglomerado caso se saiba qual a quantidade de energia que ele terá de absorver. Para os níveis de energia seleccionados verifica-se por exemplo que para 250 kJ/m³ o melhor aglomerado será os EC122. Já para 500 e 750 kJ/m³ o melhor aglomerado é o AC216. Neste caso entenda-se o melhor aglomerado como o que apresenta o valor mais baixo de

tensão para o valor de energia absorvida. Isto porque um baixo valor de tensão implica um baixo valor de pico de aceleração para uma mesma espessura.

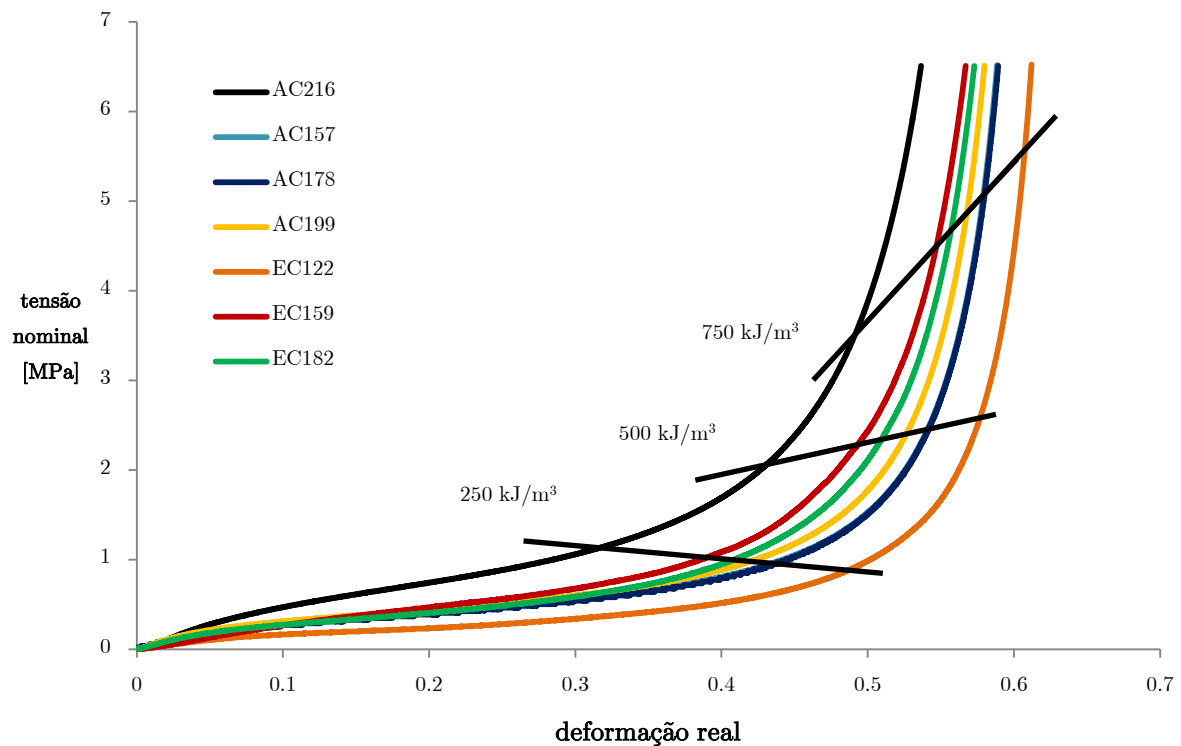


Figura 29 - Valor de deformação e tensão correspondentes para absorver 250, 500 e 750 kJ/m³

Uma outra análise que se realizou foi partir do pressuposto que se pretende ter uma tensão inferior a 6,5 MPa, como se encontra exemplificado na Figura 30. A partir deste gráfico, pode-se seleccionar qual o material que consegue absorver mais energia até se atingir uma tensão de 6,5 MPa mas sempre tendo em conta a densidade. A densidade dos materiais é um fator predominante para muitas das aplicações, como tal é interessante dispor no mesmo gráfico a energia absorvida e a densidade. Como se pode verificar o EPS90 trata-se de um material de excelência para absorver impactos, já que consegue absorver a maior quantidade de energia dos materiais estudados e é um dos menos densos. A sua grande desvantagem é o facto de não apresentar retorno elástico, incapacitando-o de absorver múltiplos impactos de forma eficiente. Já o EPP90 e o AC216 apresentam a mesma

quantidade de energia absorvida, mas com o AC216 a apresentar uma densidade mais de duas vezes superior. Apesar de o EPP90 parecer promissor, já que também apresenta retorno viscoelástico, este no entanto não possui a mesma capacidade de absorver múltiplos impactos, como se pode confirmar com na Figura 28. Existe um grupo de aglomerados constituído pelo EC159, AC157, AC178, EC182 e AC199. Este grupo, caracteriza-se por apresentar aproximadamente o mesmo valor de capacidade de absorção de energia mas com alguma variação da densidade. Com este grupo, evidencia-se que é impreciso utilizar apenas uma fonte de informação para concluir qual o melhor aglomerado para uma dada aplicação, pois como se pode verificar na Figura 26 e na Figura 28, assim como na Tabela 2 e na Tabela 3 estes aglomerados são diferentes entre si, ao contrário do que a Figura 30 possa indiciar.

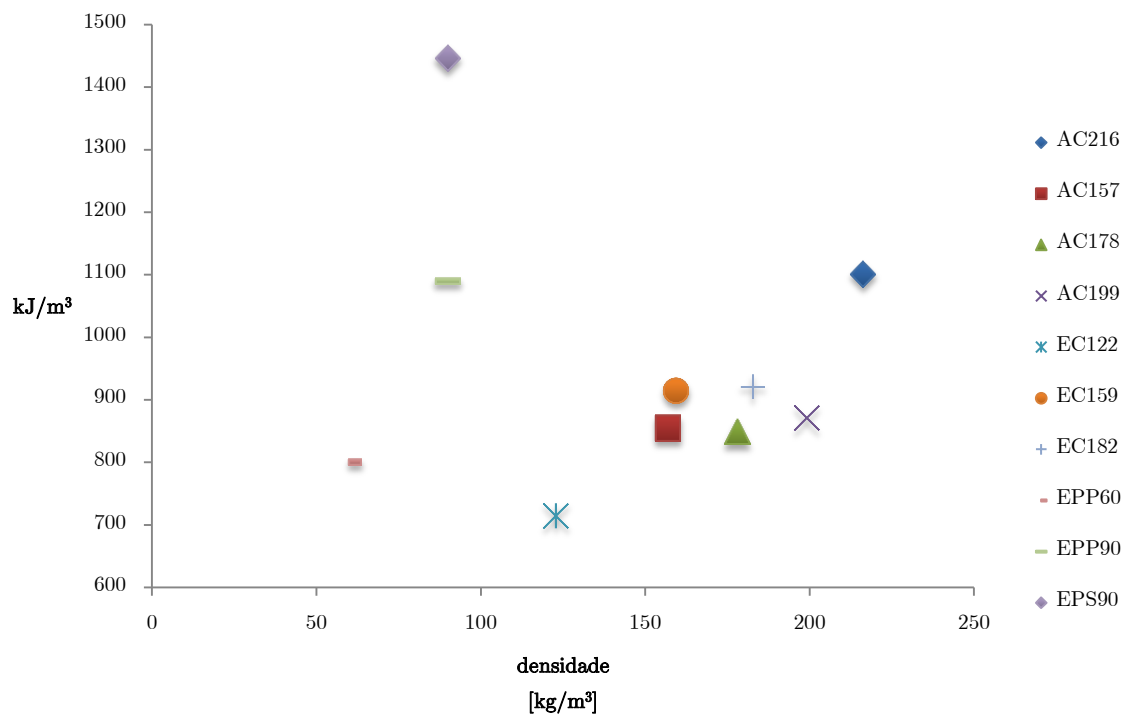


Figura 30 - Quantidade de energia absorvida até uma tensão de 6,5 MPa vs. densidade

Finalmente o EC122 e o EPP60 são os materiais com a menor capacidade de absorção de energia até 6,5 MPa. O principal motivo é o facto da sua tensão média de patamar (*plateau*) ser baixa, como se verifica na Figura 20.

Capítulo 3

Conclusões

3. Conclusões

Neste capítulo realiza-se as conclusões finais. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

3.1 Conclusões

Esta dissertação evidencia a diversidade de comportamentos mecânicos que os aglomerados de cortiça podem apresentar variando a sua densidade, granulometria, quantidade de aglomerante e processo de fabrico. Na literatura, os aglomerados são frequentemente referidos como sendo um tipo de material. No entanto, nesta dissertação foi estudado uma variedade de aglomerados de cortiça, onde foram caracterizadas as suas propriedades mecânicas estáticas e dinâmicas.

A cortiça é um material natural removido do sobreiro a cada 9 anos. É sustentável e renovável. Além disso, e como demonstrado com esta dissertação, consegue rivalizar e até superar os materiais celulares sintéticos, vulgarmente utilizados em aplicações de absorção de energia. Também, como se verificou anteriormente, quando comparados os aglomerados de cortiça com o EPS, verifica-se que os primeiros têm uma boa capacidade de manter as suas propriedades mecânicas após um impacto, enquanto o EPS degrada-se por completo após o primeiro impacto.

Um dos objetivos desta dissertação foi caracterizar os aglomerados de cortiça expandida. Apesar destes aglomerados já serem usados há muito tempo, maioritariamente para isolamento térmico e juntas de dilatação, eles revelam um grande potencial para aplicações de absorção de energia. Quando comparados com os aglomerados de cortiça, apresentam uma baixa densidade e boas propriedades mecânicas. Uma outra vantagem dos aglomerados de cortiça expandida é a ausência de aglomerante sintético, utilizando-se por sua vez a suberina naturalmente presente. Consequentemente este material tem um impacto ambiental menor.

Conclui-se que os aglomerados de cortiça podem ser adaptados e afinados com facilidade para se obter as propriedades mecânicas mais adequadas para cada aplicação.

3.2. Trabalhos futuros

Nesta dissertação fez um estudo sobre as propriedades mecânicas em regime estático e dinâmico de aglomerados de cortiça. Com os ensaios estáticos, foi possível compreender o comportamento dos aglomerados de cortiça através da curva tensão-deformação e da curva do coeficiente de Poisson. No entanto, não existe até ao momento estudos sobre a evolução do coeficiente de Poisson com a deformação.

Apesar dos avanços nos últimos anos na caracterização dos materiais, não existe ainda uma lei constitutiva específica para caracterizar o comportamento dos aglomerados de cortiça. Para uma correta caracterização é necessário ter em consideração pelo menos as características viscoelásticas, viscoplásticas (degradação das propriedades) e a não linearidade do coeficiente de Poisson. Uma lei constitutiva específica para aglomerados de cortiça seria do maior interesse na elaboração de simulações por elementos finitos. Uma quantidade considerável de tempo foi investida na tentativa de modelar os aglomerados de cortiça. No entanto, concluiu-se que as bibliotecas de leis constitutivas dos softwares comerciais

de simulações não incluem nenhuma lei com capacidade para corretamente modelar os aglomerados. Incorrendo-se assim, a erros acrescidos e consequente desvalorização dos resultados obtidos.

Com esta dissertação foi possível concluir que há vários parâmetros que influenciam as propriedades mecânicas dos aglomerados de cortiça. Parâmetros como a densidade, a granulometria e o processo de fabrico têm um papel não completamente compreendido no comportamento mecânico dos aglomerados. Como tal, é de grande interesse a realização de um estudo exaustivo e aprofundado da influência destes parâmetros. Assim, facilmente se poderia produzir um aglomerado para um fim específico.

Referências bibliográficas

- [Alcântara 2013] I. Alcântara, F. Teixeira-Dias, M. Paulino. *Cork composites for the absorption of impact energy*, Composite Structures, Volume 95, January 2013, Pages 16-27
- [Araújo 2013] J. T. A. Araújo. *Dispositivo de ensaio biaxial de provetes cruciformes*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica Universidade de Aveiro, 2013.
- [Belchior 2008] A. Belchior. *Quercus suber-Sobreiro, Cork oak tree, Alcornoque, 2008*, <http://www.panoramio.com/photo/14467008>, data de consulta: 22/09/14
- [Claro 2007] J.C.A.R. Claro, A.J.R. Valente, A.R. Pires. *Particle agglomeration process for wood and cork industrial sectors*, Patent WO 2008114103 A1, March 2007
- [Coelho 2010] R.M. Coelho. *Desenvolvimento de Sistemas de protecção passiva com recurso a materiais celulares*, Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2010.
- [Costa 2013] M. Costas, J. Díaz, L.E. Romera, S. Hernández, A. Tielas. *Static and dynamic axial crushing analysis of car frontal impact hybrid absorbers*, International Journal of Impact Engineering, Volume 62, December 2013.
- [Fernandes 2013] E.M. Fernandes, V. M. Correlo, J.F. Mano, R.L. Reis. *Novel cork-polymer composites reinforced with short natural coconut fibres: Effect of fibre loading and coupling agent addition*, Composites Science and Technology, Volume 78, 1 April 2013, Pages 56-62.

- [Fortes 1989] M.A. Fortes, M. Teresa Nogueira. *The poison effect in cork*, Materials Science and Engineering: A, Volume 122, Issue 2, 20 December 1989, Pages 227-232.
- [Fortes 1993] M.A. Fortes. *Cork and corks*. European Reviews, Vol. 1 (1993), pp.189-95
- [Fortes 2004] M.A. Fortes, M.E. Rosa, H. Pereira. *A Cortiça*, IST Press, 2007.
- [Gameiro 2007] C.P. Gameiro, J. Cirne. *Dynamic axial crushing of short to long circular aluminium tubes with agglomerate cork filler*, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 49, Issue 9, September 2007, Pages 1029-1037.
- [Germano 2014] M. M. P. Germano. *Flexible panels made of expanded cork agglomerate with optical fibers*, patent n° 2014021727.
- [Gibson 1997] L.J. Gibson e M.F. Ashby. *Cellular Solids: Structure and properties*. Cambridge University Press, second edition, 1997.
- [Gurdjian 1966] E. Gurdjian, V. Robert, L. Thomas. *Tolerance curves of acceleration and intercranial pressure and protective index in experimental head injury*, J Trauma, 6(5):600-604, 1966.
- [Macías-García 2003] A. Díaz-Parralejo, M.A. Díaz-Díez, A. Macías-García, P. de la Rosa-Blanco, V. Gómez Serrano. *Bending strength of black and composite agglomerates of cork*, Materials Letters, Volume 57, Issues 24-25, August 2003, Pages 4004-4008.
- [Mills 2007] N.J. Mills. *Polymer Foams Handbook – Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*, Butterworth Heinemann, London (2007)

- [Oliveira 2013] S.M.S. Pereira, J.R.M. Oliveira, E.F. Freitas, P. Machado. *Mechanical performance of asphalt mixtures produced with cork or rubber granulates as aggregate partial substitutes*, Construction and Building Materials, Volume 41, April 2013, Pages 209-215.
- [Pereira 2006] C. S. Pereira, G. A. M. Soares, A. C. Oliveira, M. E. Rosa, H. Pereira, N. Moreno, M. V. San Romão. *Effect of fungal colonization on mechanical performance of cork*, International Biodeterioration & Biodegradation, Volume 57, Issue 4, June 2006, Pages 244-250
- [Pereira 2007] H. Pereira. *Cork: biology, production and uses*, Elsevier Science, 2007
- [Pereira 2014] O. Anjos, C. Rodrigues, J. Morais, H. Pereira. *Effect of density on the compression behaviour of cork*, Materials & Design, Volume 53, January 2014, Pages 1089-1096
- [Popular Science 1942] Popular Science. Vol. 141, n.º 2, August 1942
- [Sanchez-Saez 2011] S. Sanchez-Saez, E. Barbero, J. Cirne. *Experimental study of agglomerated-cork-cored structures subjected to ballistic impacts*, Materials Letters, Volume 65, Issue 14, 31 July 2011, Pages 2152-2154.
- [Santos 2008] M. P. Santos. *Aplicação Estrutural de Cortiça para Melhoria da Segurança Passiva em Caso de Impacto*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica Universidade de Aveiro, 2008
- [Smith 1892] J.T. Smith. *Process of treating cork*, patent nº 484 345
- [Silvestre 2008] A.J.D. Silvestre, C.P. Neto e A. Gandini. Chapter 14 - Cork and Suberins: Major Sources, Properties and Applications, In Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources, editado por M.N. Belgacem e A. Gandini, Elsevier, Amsterdão, 2008.

- [Sousa 2011] P.A.F. de Sousa. *Upgrading of suberin from cork and birch outer bark*, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 2011
- [Sousa 2012a] R.J. Alves de Sousa, D.F.S. Gonçalves, R.M. Coelho, F.M.V.H. Teixeira-Dias. Assessing the effectiveness of the use of a natural cellular material as safety padding in motorcycle helmet, SIMULATION: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, 2012.
- [Sousa 2012b] R.M. Coelho, R.J. Alves de Sousa, F.A.O. Fernandes, F.M.V.H. Teixeira-Dias. *New composite liners for energy absorption purposes*, Materials & Design, Volume 43, January 2013
- [Sousa 2014] F.A.O Fernandes, R.J.S. Pascoal, R.J. Alves de Sousa. *Modelling Impact Response of Agglomerated Cork*, Materials & Design, 20 February 2014.
- [Sousa-Martins 2013] J. Sousa-Martins, D. Kakogiannis, F. Coghe, B. Reymen, F. Teixeira-Dias. *Behaviour of sandwich structures with cork compound cores subjected to blast waves*, Engineering Structures, Volume 46, January 2013, Pages 140-146.
- [Verdejo 2004] R Verdejo, N.J Mills. *Heel-shoe interactions and the durability of EVA foam running-shoe midsoles*, Journal of Biomechanics, Volume 37, Issue 9, September 2004.